

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Návrh osvětlovací soustavy umělého osvětlení pro pěstování
rostlin ve skleníku**

**Design of artificial lighting system for plant growing in a
greenhouse**

2018

Bc. Tomáš Drda

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Tomáš Drda

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Návrh osvětlovací soustavy umělého osvětlení pro pěstování rostlin ve skleníku

Design of artificial lighting system for plant growing in a greenhouse

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

- o Fotosynteticky aktivní záření
- o Vazby mezi energetickými, světelnými a fyzikálními jednotkami v oblasti osvětlování rostlin
- o Optimalizace spektrálního složení fotosynteticky aktivního záření
- o Požadavky na osvětlovací soustavu z pohledu fotosynteticky aktivního záření
- o Návrh modulu skleníkového osvětlení

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Sokanský, K.: Světelná technika. ČVUT, Praha 2011
- [2] Habel, J.: Světlo a osvětlování. FCC Public, Praha 2013
- [3] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU
- [4] Manuály k výpočetním programům (Relux, Dialux, WILS)
- [5] www.csorsostrava.cz

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

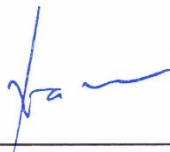
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Tomáš Novák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *30. dubna 2018*


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomáši Novákovi, Ph.D., za odbornou pomoc, cenné rady a vstřícnost při konzultacích a vypracování této diplomové práce.

Abstrakt

Náplní této diplomové práce je navrhnutí osvětlovací soustavy umělého osvětlení pro pěstování rostlin ve skleníku. V teoretické části této práce se zabývám vztahem mezi světlem a rostlinou a potažmo i rozdílem vnímání světla mezi rostlinou a člověkem. Rozebírám světlo z pohledu rostlin a objasňuji důležité pojmy a jejich požadavky na světlo. Dále řeším vazby mezi energetickými světelnými a fyzikálními jednotkami v oblasti osvětlování rostlin.

V praktické části vyvíjím metodiku pro objasnění chování jednotlivých zdrojů světla pro křivku relativní spektrální citlivosti na FAR (fotosynteticky aktivní záření). Jedním z dalších cílů je porovnání vybraných zdrojů světla v souvislosti ke vztahu k rostlinám a následně vytvoření optimalizace pro výkonové naladění barevných diod na křivku relativní spektrální citlivosti na FAR. Dalším úkolem je vytvořit návrh modulu skleníkového osvětlení, ke kterému jsem použil program ReluxPro.

Klíčová slova

fotosynteticky aktivní záření (FAR); křivka McCree; relativní spektrální citlivost na FAR; fotosyntetický fotonový tok (PPF); LED; fotosyntetická hustota fotonového toku (PPFD); osvětlovací soustava;

Abstract

The subject of this diploma thesis is to design a lighting system for artificial lighting for planting in the greenhouse. In the theoretical part of this thesis I deal with the context between light and plant and, consequently, with the difference of the perception of light between the plant and the human. I analyze the light from the point of view of plants and explain the important concepts and their requirements for the light. I also deal with the links between energy light and physical units in the field of plant lighting.

In the practical part I develop a methodology for elucidating the behavior of individual light sources for the curve of relative spectral sensitivity to PAR (photosynthetic active radiation). One of the other objectives is to compare selected artificial light sources in a relation to the plant context and subsequently to create optimization for the power tuning of the color diodes on the relative spectral sensitivity curve on the PAR. Another task is to design a greenhouse – using the ReluxPro program.

Key words

photosynthetic active radiation (PAR); the McCree curve; relative spectral sensitivity to PAR; photosynthetic photon flux (PPF); LED; fotosyntetic photon flux density (PPFD); lighting system;

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Význam symbolu	Jednotky
ATP	Adenosine triphosphate (adenosintrifosfát)	
CO₂	Oxid uhličitý	
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování	
c	Rychlost světla ve vakuu = $2,99792458 \cdot 10^8$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
DIN	Německá národní norma	
E_f	Energie fotonu	J
e_λ	Spektrální intenzita ozáření	$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$
E	Intenzita osvětlení	lx
E_{FAR}	Intenzita ozáření ve FAR spektru	$\text{W}_{\text{FAR}} \cdot \text{m}^{-2}$
E_{mol}	Intenzita fotonového toku ve FAR spektru	$\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
FAR	Fotosynteticky aktivní záření ve spektru 400 až 700 nm	
h	Planckova konstanta = $6,62606957 \cdot 10^{-34}$	$\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$
IR	Infračervené záření	
LED	Light emitting diode	
N_A	Avogadrova konstanta = $6.0221413 \cdot 10^{23}$	
PAR	Photosynthetically active radiation (anglický název pro FAR)	
PPF	Photosynthetic photon flux (fotosyntetický fotonový tok)	$\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$
PPFD	Photosynthetic Photon Flux Density (fotosyntetická hustota fotonového toku)	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
RQE	Relative quantum efficiency	
UV - A	Ultrafialové záření v oblasti s vlnovou délkou 320 – 400 nm	
UV - B	Ultrafialové záření v oblasti s vlnovou délkou 280 – 320 nm	
UV - C	Ultrafialové záření v oblasti s vlnovou délkou 280 – 210 nm	
λ	Vlnová délka	nm
W_e	Energie	eV

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	7
Úvod.....	10
1 Světlo a rostlina	11
1.1 Fotosyntéza.....	13
1.2 Elektromagnetické spektrum.....	14
2 Fotosynteticky aktivní záření	16
2.1 Měření světla z pohledu FAR.....	18
2.1.1 Světelné senzory.....	18
2.1.2 Měření fotosynteticky aktivního záření.....	19
2.2 Požadavky rostlin na světlo.....	22
2.3 Intenzita a celkové množství FAR	23
3 Vazby mezi energetickými světelnými a fyzikálními jednotkami v oblasti osvětlování rostlin	25
3.1 Integrální veličiny	25
3.2 Spektrální veličiny.....	25
3.3 Vzájemný převod integrální kvantové a energetické ozářenosti.....	26
3.4 Fotometrické veličiny.....	27
3.5 Vztah mezi objektivními a subjektivními jednotkami.....	27
3.6 Vyjádření FAR veličin	29
4 Vytvoření metodiky pro výpočet PPF	31
4.1 Křivky pro kvantifikaci spektra světla ke kultivaci rostlin	32
4.1.1 Křivka relativní spektrální citlivosti na FAR (The McCree curve).....	33
4.1.2 Křivka PAR.....	34
4.1.3 Křivka DIN Standard 5031-10	36
4.1.4 Srovnání křivek McCree a PAR.....	36
4.1.5 Sluneční světlo	37
4.2 Výpočet fotosyntetického fotonového toku (PPF).....	38
4.2.1 Odvození citlivosti rostlin	39
4.3 Vytvoření metodiky pro výpočet PPF v programu MS Excel.....	41

5	Srovnání a optimalizace světelných zdrojů.....	45
5.1	Spektrum výbojky NAV-E 70 W/I E27	46
5.2	Spektrum bílé LED GW CS8PM1.PM.....	47
5.3	Optimalizované spektrum	48
5.4	Srovnání parametrů	49
5.4.1	Metodika výpočtu vyzářeného výkonu z příkonu světelného zdroje	49
5.4.2	Výpočet ostatních parametrů pro srovnání světelných zdrojů.....	51
5.4.3	Zhodnocení parametrů světelných zdrojů a optimalizace	52
6	Požadavky na osvětlovací soustavu z pohledu FAR.....	53
6.1	Fotosynteticky aktivní osvětlovací soustava ve skleníku	55
7	Návrh modulu skleníkového osvětlení.....	57
	Závěr.....	60
	Použitá literatura.....	62
	Seznam obrázků	65
	Seznam tabulek.....	66
	Seznam příloh	66

Úvod

Viditelné světlo je stejně nepostradatelné jak pro rostliny, tak pro lidi. Sluneční záření rostliny vnímají jak po stránce kvantitativní – jakému množství záření jsou vystaveny, tak i kvalitativní – jaká část spektra záření právě dopadá. Rostliny vnímají světlo odlišně než lidské oko. Jedná se hlavně o rozdílnou spektrální citlivost. Lidské oko je nejcitlivější na vlnové délky přibližně uprostřed spektra viditelného záření, ale rostliny jsou nejcitlivější na záření na okrajích tohoto spektra, tzn. na modrou a na červenou část spektra a částečně mohou být citlivé i na záření v oblasti UV a IR. Spektrum vhodné pro osvětlování rostlin se tedy nachází v oblasti viditelného záření a nazývá se fotosynteticky aktivní záření (FAR). Každá rostlina má specifické nároky pro svůj vývoj, tzn. spektrální citlivost rostlin, intenzita záření a další parametry, které závisí na druhu rostlin.

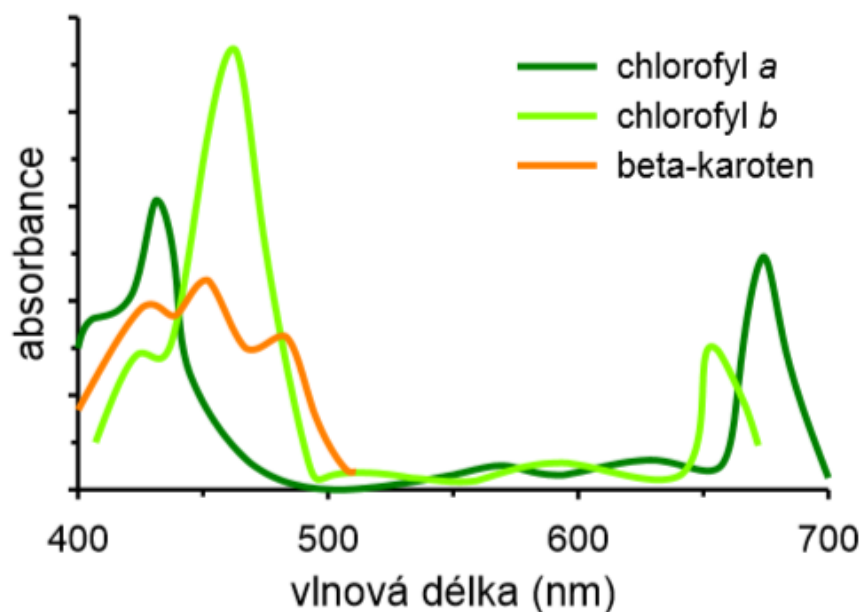
Teoretická část této práce se zabývá charakteristickými požadavky rostlin na světlo vedoucí k úspěšnému vývoji a růstu. Dále pak jsou objasněny vazby mezi energetickými světelnými a fyzikálními jednotkami v oblasti osvětlování rostlin.

V praktické části této práce vytvářím metodiku, pomocí které jsem schopen určit, jak se chovají jednotlivé světelné zdroje v závislosti na křivce spektrální citlivosti rostlin, jinak řečeno na jedné straně mám světelný zdroj a z druhé strany dostanu fotosyntetický fotonový tok (PPF) v jednotkách $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Hodnota PPF je specifikována pro všechny zdroje světla určené pro potřeby rostlin, protože bylo dokázáno, že rychlost fotosyntézy závisí na počtu fotonů v rozsahu FAR (400 až 700 nm), jedná se tedy o jediný spolehlivý způsob měření, zda je světelný zdroj vhodný pro fotosyntézu. Čím vyšší je hodnota PPF na watt, tím účinnější je zdroj pro růst rostlin. Dále srovnávám energetickou náročnost světelných zdrojů a vytvořenou optimalizaci pro křivku relativní spektrální citlivosti na FAR. Posledním úkolem této práce je navrhnout modul skleníkového osvětlení, který byl vytvořen v programu ReluxPro.

1 Světlo a rostlina

Rostliny jsou základem života na Zemi. Bez rostlin by vyhynuly býložravé a následně i masožravé a všežravé druhy živočichů a bez světla by neexistovaly rostliny. Rostliny jsou základem potravinového řetězce, produkují organické látky a kyslík a tím umožňují život všech dalších vyšších živých organismů. Rostliny využívají světlo jako důležitý zdroj při fotochemických procesech a to tak, že ho absorbují listovými pigmenty. Tyto procesy ovlivňují tvorbu květů rostlin, jejich tvar a celkovou stavbu, ale nejdůležitějším z těchto procesů je fotosyntéza. Fotosyntéza využívá světelné záření ke přeměně CO_2 a vody na sacharidy a následně na další látky (asimiláty), které společně tvoří stavební kameny rostlinných tkání.

Světelnou energii rostliny získávají prostřednictvím světelných kvant, fotonů. Fotony jsou pohlcovány pigmenty, především chlorofylem a, chlorofylem b a karotenoidy, ale i jinými pigmenty.



Obr. 1: Absorpční spektrum tří důležitých listových barviv [23]

Na obrázku vidíme absorpční spektra tří důležitých listových barviv. Absorpční spektrum nám ukazuje, jak silně je světlo různých vlnových délek pohlcováno zkoumanou látkou, kde intenzitu pohlcování vyjadřuje tzv. absorpce.

Každý foton vždy uvolní jeden energeticky bohatý elektron a ten vstupuje do vlastních biochemických procesů, které jsou buď anabolické – spojené s výstavbou látek (fotosyntéza), nebo katabolické – související s odbouráváním a rozkladem látek (dýchání).

Nejdůležitějšími podmínkami pro růst rostlin jsou hlavně:

- světlo,
- CO₂,
- teplota, popř. vlhkost vzduchu,
- teplota půdy,
- obsah vody v půdě,
- živiny.

Tyto podmínky pro růst rostlin jsou více méně rovnocenně důležité, avšak když je omezeno denní světlo, omezí se i optimalizace ostatních faktorů, které ale můžeme použitím doplňkového osvětlení pro podporu růstu rostlin optimalizovat. Ve svém přirozeném prostředí jsou rostliny vystaveny přímému slunečnímu a nepřímému rozptylovému záření. Při umělém osvětlení rostlin se snažíme vytvořit podobné podmínky, které mají rostliny ve svém přirozeném prostředí. Umělé osvětlení používáme hlavně v zahradnictví k stimulaci růstu rostlin a k tvorbě květů a plodů. Asimilační osvětlení je doplňkové umělé osvětlení, které se využívá k prodloužení přirozeného denního osvětlení. Asimilační osvětlovací soustavy umožňují hlavně:

- prodloužit dobu produkce plodin,
- zvýšit úrodu,
- zlepšit kvalitu,
- zlepšit řízení a plánování produkce,
- zajistit spolehlivou a pravidelnou dodávku zemědělských produktů.

Umělé osvětlení využíváme také v růstových komorách jako úplnou náhradu přirozeného denního osvětlení, kde se jedná o tzv. kultivační osvětlení. Hodně rozšířené je i fotoperiodické osvětlování rostlin, které reguluje dobu kvetení a umožňuje indukci květů dlouhodenních rostlin i v zimním období. Asimilační osvětlení je oproti fotoperiodickému osvětlení energeticky podstatně méně náročnější, potřebné intenzity osvětlení jsou řádově deset až patnáctkrát nižší.

Pro osvětlení rostlin musíme použít takové světelné zdroje, které musí splňovat jejich požadavky na intenzitu a spektrální složení záření. Kromě toho, že světlo slouží především jako zdroj energie pro fotosyntézu, tak je také důležité pro všechny ostatní fotobiologické procesy

roślin, které jsou společně s fotosyntézou závislé na vlnových délkách pohlceného záření. Největší účinnost fotosyntézy je v oblasti červené a modré části spektra, proto někteří výrobci světelných zdrojů určených pro rostliny vyrábějí zdroje, které emitují světlo právě v těchto částech světelného spektra. Ve spektru těchto zdrojů je potlačena žlutozelená oblast spektra, kde je účinnost fotosyntézy menší, proto je vyzařované světlo purpurové barvy.

Podle nejnovějších vědeckých studií, které se snaží stanovit celkovou spektrální citlivost rostlin k optickému záření, má celá část viditelného záření, tedy i žlutozelené části, podstatný vliv na vývoj a růst rostlin. [1], [2]

1.1 Fotosyntéza

Fotosyntéza je fotochemický proces, při kterém fotosynteticky aktivní pigmenty v zelených částech rostlin přijímají energii světelného záření a přeměňují ji na energii chemickou. Tato energie je dále využita při biologických syntézách, což je proces tvorby organických látek (hlavně sacharidů) z látek anorganických, a to z oxidu uhličitého a vody.

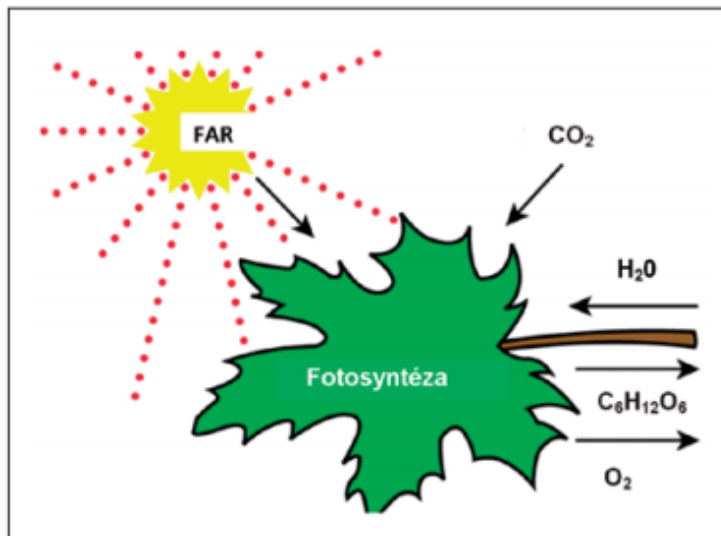
Fotosyntéza vyšších rostlin je vázána především na mezofylové buňky v listech a probíhá ve specializovaných organelách, které se nazývají chloroplasty. V nich probíhá fotosyntéza ve dvou fázích - světelné a temnostní.

U světelné fáze, ve které probíhají fotochemické reakce, je podstatou těchto primárních reakcí štěpení vody na světlo, které poskytuje elektrony a vodíkové kationy (protony) pro tvorbu ATP a NADPH + H.

U Temnostní fáze fotosyntézy s charakteristickými enzymatickými reakcemi probíhají sekundární reakce, kde je podstatou fixace a redukce CO₂ a tvorba sacharidů, primárně glukózy.

Fotosyntéza má nezastupitelný význam pro udržení života na naší planetě, neboť:

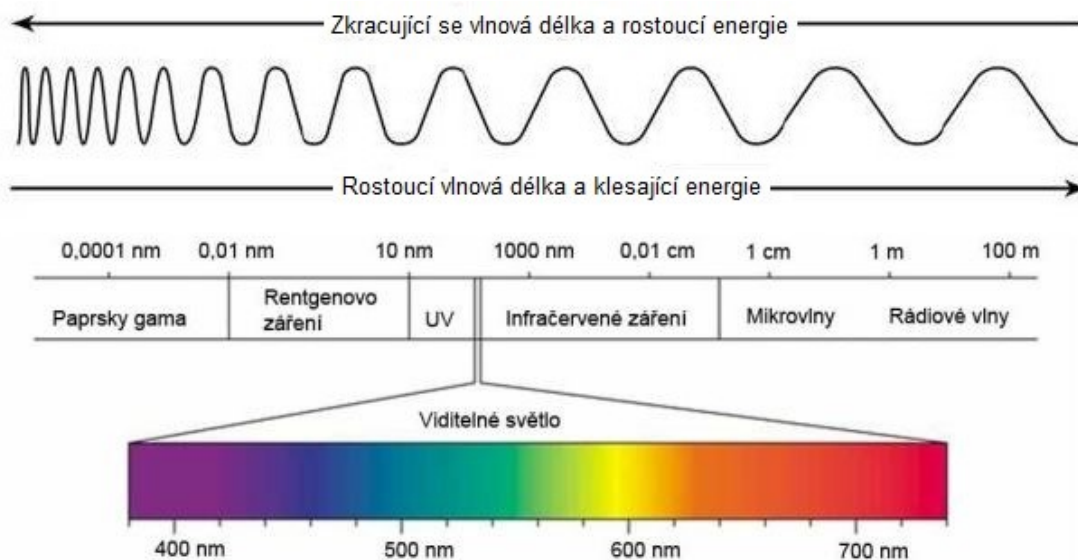
1. Zachycuje sluneční energii a z nejjednodušší sloučeniny uhlíku, tedy CO₂, syntetizuje organické látky, které jsou nezbytné pro výživu chemotrofů.
2. Je hlavním producentem kyslíku nepostradatelného pro existenci aerobních organismů. [3]



Obr. 2: Proces fotosyntézy [1]

1.2 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické spektrum obsahuje elektromagnetické záření všech možných vlnových délek. Šíření světla probíhá v malých dávkách, jejichž jednotky jsou fotony. Energie, která je obsažena ve fotonu, se nazývá světelné kvantum. Světla různých barev mají různé vlnové délky a představují fotony o různé energii. Kratší vlnová délka odpovídá větší energii. Proto tedy fotony modrého světla mají větší energii než např. fotony červeného světla. Přehled elektromagnetického vlnění ukazuje následující obrázek.



Obr. 3: Světelné spektrum elektromagnetického vlnění [24]

Kromě pro rostliny tolik potřebného fotosynteticky aktivního záření pro dostatek energie k fotosyntetickým procesům, rostliny potřebují i záření nejkratších vlnových délek v ultrafialové oblasti, které mají vliv na fotomorfogenetické procesy. Následující tabulka ukazuje přehled vlnových délek a energie fotonů pro různé oblasti světelného spektra elektromagnetického vlnění.

Tab. 1: Vlnové délky a energie fotonů pro různá pásma světelného spektra [4], [5]

pásma	rozsah (nm)	energie v 1 molu fotonů (kJ)	Energie W_e (eV)
UV – C	100 – 280	471	12,4 ÷ 4,4
UV – B	280 – 315	399	4,4 ÷ 3,9
UV – A	315 – 380	352	3,9 ÷ 3,2
fialová	380 – 430	292	3,2 ÷ 2,9
modrá	430 – 490	261	2,9 ÷ 2,5
zelená	490 – 570	230	2,5 ÷ 2,2
žlutá	570 – 600	206	2,2 ÷ 2,0
oranžová	600 – 630	193	2,0 ÷ 1,9
červená	630 – 780	176	1,9 ÷ 1,6
infračervená	nad 780	85	1,6 ÷ 0,9

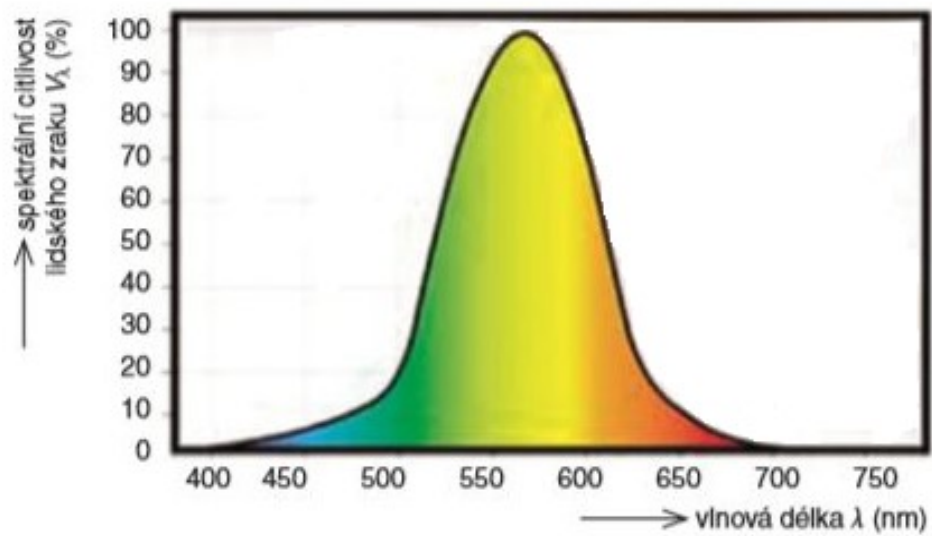
Spektrum viditelného světla a blízkého UV záření nemá škodlivý efekt, protože energie 1 molu vazby O-H je 463 kJ, rostliny jsou tedy nejspíše adaptovány na oblast blízkého UV záření, ale záření v pásmu UV - C a kratších vlnových délek má velmi škodlivé účinky, protože poškozuje strukturu organických molekul. [4], [5]

2 Fotosynteticky aktivní záření

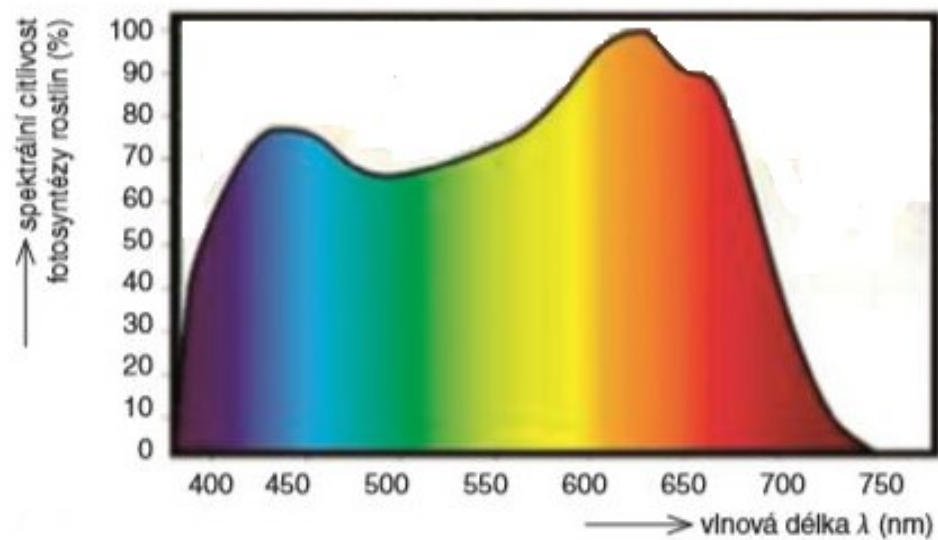
Sluneční záření obsahuje širokou oblast spektra optického záření. Obsahuje ultrafialové záření UV (vlnové délky 300 až 380 nm), viditelné záření (380 až 780 nm), a infračervené záření IR (780 až 3000 nm). Fotosynteticky aktivní záření (FAR) je spektrum vhodné pro fotosyntézu a leží v oblasti viditelného záření. FAR obsahuje tedy vlnové délky 400 až 700 nm. Spektrální citlivost rostlin se liší od spektrální citlivosti lidského oka. Lidské oko má největší citlivost přibližně uprostřed viditelného spektra, kde je maximum kolem 555 nm, ale rostliny mají největší citlivost v oblastech na krajích viditelného spektra, tedy v „modré“ (s maximem asi 450 nm) a „červené“ (s maximem asi 660 nm) části spektra viditelného záření. V červené oblasti spektra je účinnější fotosyntéza a stimuluje kvantitativní nárůst rostliny. Modrá část spektra značně ovlivňuje morfologické vlastnosti, zajišťuje kvalitní růst rostlin tím, že zabráňuje přílišnému vytahování rostlin do výšky, podporuje odnožování a množství listů.

Tohle je důležité z hlediska osvětlování rostlin, protože většina světelných zdrojů je určená pro potřeby lidského zraku a tím pádem vyzařují jen velmi málo FAR, které je tak potřebné pro rostliny. Proto nejsou světelné zdroje určené pro potřeby člověka vhodné pro osvětlování rostlin. Podobný problém je i v případě měření pomocí fotometrických přístrojů, které jsou navrženy tak, aby měřily světlo podobně, jako jej vnímá lidské oko. Proto se na světlo určené pro rostliny používají jiné metody a jednotky světelných veličin na posouzení vhodnosti osvětlení pro rostliny.

Globální záření je veškeré záření ze Slunce a je zastoupeno jak přímým slunečním zářením, tak i rozptýleným zářením oblohy. Fotosynteticky aktivní záření tvoří 45 % z hodnoty globálního záření. Při posuzování vlivu slunečního záření ve skleníku musíme počítat s tím, že kvůli odrazu a absorpci skleníkové konstrukce, vstupuje do skleníku v závislosti na ročním období a použitém materiálu zasklení pouze 65 až 80 % energie, která dopadá na vnější konstrukci skleníku. [1]



Obr. 4: Spektrální citlivost lidského oka [1]



Obr. 5: Relativní spektrální citlivost na FAR [1]

2.1 Měření světla z pohledu FAR

Světlo je velmi složitý jev, nelze ho měřit stejně snadno jako teplotu nebo tlak vzduchu. Téměř všechny zdroje světla, včetně Slunce, vyzařují spektrum skládající se z velkého počtu vlnových délek s různou intenzitou.

Pro pěstitelské účely máme obvykle zájem měřit tři vlastnosti světla:

- zářivý tok - množství celkové světelné energie dopadající na povrch,
- spektrální kvalita - složení vlnových délek a relativní intenzita,
- doba trvání - délka denního osvětlení.

Kombinace těchto tří charakteristik určuje množství okamžité a kumulativní energie, která je k dispozici pro fotosyntézu. [10]

2.1.1 Světelné senzory

Pro pěstitele jsou světelné senzory užitečné pro integrované řízení ve sklenících a pro plánování a umístění svítidel pro doplňkové a fotoperiodické osvětlení. K dispozici jsou tři hlavní typy snímačů, z nichž každý je určen pro různé aplikace. [10]

2.1.1.1 Fotometrické senzory

Fotometrické senzory jsou navrženy tak, aby napodobovaly reakci lidského oka. Nejčastěji se používají při osvětlovacích aplikacích pro lidské použití. Jednotky měření pro fotometrii jsou obvykle vyjádřeny v luxech nebo v lumenech.

Nejsou vhodné zvláště pro použití v pěstitelských aplikacích, protože nám nemusí poskytnout přesnou odezvu fotosyntetického účinku spektra vyzařovaného různými zdroji světla. Jinými slovy, ačkoli světelný zdroj může být vhodný pro lidské oko, tak nemusí být dostačující pro pěstování rostlin.

Fotometrické senzory však mohou být použity k tomu, aby poskytly dobrou relativní hodnotu intenzity a stejnoměrnosti osvětlení na plodinách. [10]

2.1.1.2 Pyranometry

Pyranometry pro venkovní použití jsou určeny k měření slunečního záření získaného z celé hemisféry. Měří ve wattech na metr čtvereční ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Vzhledem k tomu, že měří globální sluneční záření (přímé sluneční záření + záření rozptýlené atmosférou včetně záření odraženého od mraků), jsou obzvláště užitečné pro skleníky,

kteřé využívají meteorologické stanice spojené s počítačovou kontrolou prostředí ve skleníku. Hodnoty pyranometru mohou být použity k tomu, aby pomohly k řadě úpravám klimatu.

S jediným měřením mohou vzít v úvahu vliv lokality, oblasti, zeměpisné šířky, sezóny, denní doby a denního vlivu počasí na dostupné záření. Pyranometry mohou měřit změny v hustotě toku energie jak z přímého paprsku, tak i z difuzního záření oblohy, procházejícího vodorovnou rovinou.

Pyranometry nejsou zvláště užitečné pro hodnocení dodatečných zdrojů osvětlení, protože jsou optimalizovány pro sluneční záření. [10]

2.1.1.3 FAR senzory

FAR nebo kvantové senzory měří fotosynteticky aktivní záření (FAR) ve vlnovém pásmu 400 až 700 nm. Jednotkou měření jsou mikromoly na metr čtvereční za sekundu ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

Používají se především v aplikacích pro výzkum pěstování rostlin, pro měření FAR ve sklenících, růstových a klíčových komorách a v laboratorních aplikacích a studiích světla. V komerčních sklenících při použití nových osvětlovacích systémů můžeme u naměřených hodnot FAR porovnávat stejnoměrnost a intenzitu FAR při nasazení nových osvětlovacích systémů. [10]

2.1.2 Měření fotosynteticky aktivního záření

Měření fotosynteticky aktivního záření provádíme z hlediska potřeb rostlin. Měření intenzity FAR můžeme provádět pomocí μmol metru, tedy přístrojem, který měří počet částic světla v rozsahu vlnových délek 400 – 700 nm. Z μmol metru dostaneme intenzitu FAR udávanou v $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Jinou možností by bylo změřit hodnoty osvětlenosti luxmetrem, kde by byl jednotkou lx a poté provést přepočet na jednotky $W_{\text{FAR}}\cdot\text{m}^{-2}$ a $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Měření viditelného záření luxmetry, ale není dobrým identifikátorem pro optimální růst rostlin, protože měření luxmetrem je založeno na spektrální citlivosti lidského oka. Spektrální citlivost rostlin je odlišná, větší citlivost se projevuje v krajních oblastech viditelného spektra. Přístroje pro měření světla, které vyhovují i pro měření světla potřebného pro rostliny jsou radiometr a spektrometr. [1]

2.1.2.1 Radiometr

Radiometr měří elektromagnetické záření. Měřením elektromagnetického záření se zabývá část optiky zvaná radiometrie a zahrnuje tedy i viditelné světlo. Radiometrie používá absolutní veličiny, protože se zabývá měřením elektromagnetického záření v prostoru. Množství energie přenesené na ozařovaná tělesa je charakterizováno radiometrickými veličinami (energetickými). Radiometr je sestaven z prvku citlivého na světlo a filtru, který se snaží přiblížit Gaussovskému tvaru v spektrální oblasti. [6]



Obr. 6: Radiometr [25]

2.1.2.2 Spektrometr

Spektrometr je měřicí přístroj, který umožňuje měřit energetický výkon světelného zdroje v různých částech světelného spektra. Ve viditelné oblasti spektra odpovídají jednotlivým frekvencím barvy světla, kde např. červené barvě odpovídají vlnové délky okolo 620 nm, zelené okolo 555 nm a modré okolo 480 nm. Mícháním spektrálních barev vznikají barvy další, kde asi nejdůležitější zastoupení má barva bílá, kterou dostaneme smícháním barev RGB (červené, zelené a modré) nebo dvou doplňkových barev (modré a žluté).

Spektrometr neurčí jenom výslednou barvu světla, kterou i vidíme pouhým okem, ale také dokáže určit, z jakých spektrálních barev tato barva byla namíchána. Je to důležité, protože látky v rostlinách reagují různě na různé spektrální barvy, proto dvě světla, která mají stejnou výslednou barvu, mohou působit velmi odlišně na rostliny. [6]

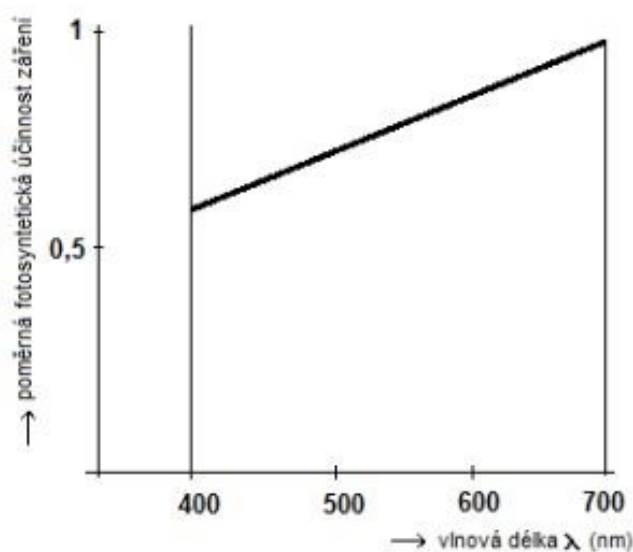


Obr. 7: Spektrometr [26]

2.2 Požadavky rostlin na světlo

Rostliny mají specifické požadavky hlavně na spektrum a intenzitu záření a velký vliv má také úhel dopadu záření. Požadavky na spektrum se mění v závislosti na druhu rostliny a na její fázi vývoje, celá část viditelného záření má jistý vliv, ale pro rychlost fotosyntézy tzn. rychlost růstu rostliny je nejdůležitější dostatečná intenzita záření neboli fotosyntetická hustota fotonového toku (PPFD) v modré a červené části spektra FAR. Rostliny potřebují během celého roku dostačující množství a intenzitu FAR, která je nezbytná pro optimální vývoj, růst a kvetení. Nedostatek se projeví zvýšenou náchylností k chorobám.

Největším rozdílem oproti požadavkům lidského oka je spektrální citlivost rostlin, která se obvykle během denního cyklu znatelně mění. Působení FAR na proces fotosyntézy, je odlišné od aktivity světla v procesu vidění. Při fotosyntetické účinnosti záření v závislosti na vlnové délce, vycházíme z předpokladu, že je fotosyntéza energetický proces a účinnost záření hodnotíme počtem fotonů. Energie fotonu nepřímo úměrně závisí na vlnové délce záření. V procesu fotosyntézy je FAR v dlouhovlnné oblasti účinnější než v oblasti krátkovlnné.



Obr. 8: Poměrná fotosyntetická účinnost FAR [7]

Během dne jsou rostliny schopné přijmout pouze určité množství energie rozložené v čase. Je potřeba střídat během denního cyklu fáze ozáření, protože se střídají katabolické a anabolické procesy. Dostatečná intenzita záření, tedy PPFD je různá pro jednotlivé druhy rostlin, můžeme je podle požadavků na PPFD rozdělit do tří skupin:

- rostliny s vysokými požadavky – PPFD s hodnotou více než $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (v energetických jednotkách asi $75 W_{\text{FAR}}\cdot\text{m}^{-2}$),
- rostliny se středními požadavky – PPFD s hodnotou 40 až $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (v energetických jednotkách rozmezí 20 až $25 W_{\text{FAR}}\cdot\text{m}^{-2}$),
- rostliny s nízkými požadavky – PPFD s hodnotou menší než $40 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (v energetických jednotkách přibližně $20 W_{\text{FAR}}\cdot\text{m}^{-2}$).

Pro představu PPFD s hodnotou $6 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ odpovídá přibližně 500 lx.

Dalším důležitým požadavkem je správný úhel dopadu záření na rostliny, protože dochází k odrazu určité části dopadajícího záření kvůli povrchovým vlastnostem většiny rostlin. Při kolmém dopadu záření na povrch rostliny nastává nejvyšší absorpce, při zvyšování úhlu od kolmice dopadajícího záření se absorpce snižuje a při úhlech 50° od kolmice je většina dopadajícího záření odražena nebo rozptýlena do okolí. [1], [7], [8]

2.3 Intenzita a celkové množství FAR

Intenzita FAR neboli PPFD ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) a dávka FAR ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$) jsou nejvýznamnější parametry fotosynteticky aktivního záření.

Intenzita FAR určuje rychlost fotosyntézy, tedy absorpci CO_2 . Při malých úrovních ozáření je účinnost fotosyntézy vyšší a s rostoucí intenzitou fotosynteticky aktivního ozáření se snižuje. V určitém bodě je rychlost fotosyntézy omezována a dosahuje saturační úrovně. Vzájemný vztah mezi intenzitou FAR a fotosyntézou je závislý hlavně na druhu rostlin, vývojovém stadiu a celkových podmínkách růstu. Velice důležité je stanovit mezní intenzitu ozáření, která nám stanoví světelný kompenzační bod a určuje, při které mezní intenzitě ozáření asimilační produkty ještě přispívají k nárůstu rostlinné hmoty. Při nižších hodnotách ozáření rostliny také asimilují, ale asimilát je zároveň odbouráván dýcháním rostlin. Směrodatná hodnota pro výpočet potřebného výkonu asimilačních svítidel a která zároveň také určuje dobu jejich zapínání nebo vypínání při doplňkovém osvětlování je obvykle dvoj- až trojnásobek hodnoty,

kteřá je udávaná pro doporučenou intenzitu ozáření. Svítidla jsou v provozu, když intenzita globálního slunečního záření uvnitř skleníku je nižší než doporučená hodnota.

Světelně technické výpočty osvětlovacích soustav se běžně provádějí fotometrickými jednotkami, kde intenzita osvětlení se udává v luxech (lx), proto je užitečné pro jednotlivé světelné zdroje uvádět přepočítávací koeficienty.

Kromě intenzity ozáření FAR, která je důležitá pro rychlost fotosyntézy, je pro celkové množství nárůstu rostlinné hmoty důležité celkové množství, tedy denní dávka FAR. Tato dávka se, ale pro jednotlivé rostliny obvykle neuvádí, místo ní se udává denní doba přisvětlování. [1]

3 Vazby mezi energetickými světelnými a fyzikálními jednotkami v oblasti osvětlování rostlin

Světlo (elektromagnetické záření ve viditelné oblasti) dopadající na plochu se většinou vyjadřuje v jedné ze třech veličin o různých jednotkách. Objektivních veličin máme dva typy (energetická a kvantová) a třetí veličina je subjektivní (fotometrická). Objektivní veličiny můžeme dělit na integrální a spektrální. Fotometrické veličiny jsou vztaženy k citlivosti lidského oka a nejsou vhodné pro použití v rostlinné fyziologii, protože rostliny vnímají světlo jinak než lidské oko. [9]

3.1 Integrální veličiny

Mezi tyto veličiny patří **energetická ozáření** I_{en} s jednotkou $W \cdot m^{-2}$. Dříve se tato veličina používala pro charakterizaci FAR a uplatnění našla při uvádění záření mimo viditelnou oblast. Veličina uvádí plošný příkon v jednotkách $W \cdot m^{-2}$, tedy množství energie (v J – joulech), které dopadne za jednotku času (1 s) na jednotkovou plochu (1 m^2). Podobnou veličinou je **hustota zářivého toku**, kterou chápeme jako tok energie za jednu sekundu jednotkovou plochou postavenou kolmo k paprsku. Jednotky má stejné.

Další veličinou je **kvantová ozáření** I_{kv} s jednotkou $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. Někdy se s ní můžeme setkat v jednotce $\mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, ale její použití se nedoporučuje. Písmeno E znamená jednotku „einstein“ a má to stejný význam jako mol fotonů, tedy Avogadrovo číslo $6,023 \cdot 10^{23}$, tj. počet fotonů v jednom molu. Tato jednotka vyjadřuje integrální ozáření v určitém spektrálním intervalu. Pro rostliny je definujeme tzv. FAR (fotosynteticky aktivní záření) a myslíme tím záření v pásmu 400 – 700 nm. Firmy dodávající přístroje měřící FAR je uvádějí v kvantových jednotkách, tj. $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. Veličina podobná kvantové ozáření je **kvantový tok**, který chápeme většinou jako tok fotonů za jednu sekundu jednotkovou plochou postavenou kolmo k paprsku. Jednotky má stejné. [9]

3.2 Spektrální veličiny

Mezi tyto veličiny se řadí **spektrální energetická ozáření** $I_{en}(\lambda)$. Ve spektru si volíme osu x spektra a podle toho zvolíme jednotky. Většinou se volí vlnová délka v nm a jednotky jsou tedy $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$. Můžeme také hovořit o **energetickém spektru** nebo o **spektrální hustotě záření**.

Další veličinou je spektrální kvantová ozáření $I_{kv}(\lambda)$. V tomhle případě si taky volíme osu x spektra a podle toho si zvolíme jednotky. Zase se nejčastěji volí vlnová délka v nm a jednotky budou $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$. Rozumíme tomu jako kvantová ozáření připadající na jednotku vlnové délky, můžeme to nazývat také **kvantovým spektrem**. [9]

3.3 Vzájemný převod integrální kvantové a energetické ozáření

Pro převedení integrální kvantové ozáření I_{kv} na integrální energetickou ozáření I_{en} nebo opačně, musíme znát některé z uvedených spekter, převodní vztah je potom integrálem přes tu definovanou oblast vlnových délek. Když budeme například převádět energetickou ozáření I_{en} na kvantovou I_{kv} , při znalosti energetického spektra $I_{en}(\lambda)$, musíme $I_{en}(\lambda)$ vyjádřit v počtu fotonů o vlnové délce λ a to je

$$I_{kv}(\lambda) = \frac{I_{en}(\lambda)}{h\nu} = \frac{I_{en}(\lambda)\lambda}{hc} \quad (1)$$

Potom

$$I_{kv} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{I_{en}(\lambda)\lambda}{hc} d\lambda \quad (2)$$

kde

$h = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ (Planckova konstanta)

$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (rychlost světla ve vakuu)

ν ...frekvence světla (Hz)

Pro převod kvantové ozáření I_{kv} na energetickou I_{en} musíme $I_{kv}(\lambda)$ násobit energií fotonu o vlnové délce λ : [9]

$$I_{en}(\lambda) = I_{kv}(\lambda) \cdot h\nu = \frac{I_{kv}(\lambda)hc}{\lambda} \quad (3)$$

$$I_{en} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{I_{kv}(\lambda)}{\lambda} hc \cdot d\lambda \quad (4)$$

3.4 Fotometrické veličiny

Fotometrické veličiny jsou subjektivní veličiny, protože popisují subjektivní vnímání, ale jako fyzikální veličiny jsou definovány objektivně, protože vztah k radiometrickým veličinám (charakteristikám elektromagnetického záření nezávislým na lidském vnímání) je dán normativní spektrální světelnou účinností.

Na záření dopadající na danou plochu se používá fotometrická veličina **osvětlení** a jednotkou je jeden lux (značí se lx). Jeden **lux** chápeme jako světelný tok o jednom lumenu dopadající na jednotkovou plochu.

Jeden **lumen** je jednotkou **světelného toku**. Je definován jako světelný tok, který vyzařuje do prostorového úhlu jeden steradián (sr) bodový zdroj, jehož svítivost je ve všech směrech rovna jedné kandelu (cd).

Jednu **kandelu** definujeme jako svítivost bodového zdroje, který v daném směru vysílá monochromatické záření o frekvenci $540 \cdot 10^{12}$ Hz, což je vlnová délka ve vakuu 555 nm a to je vlnová délka záření, kde je nejvíce citlivé lidské oko a jehož zářivost v tomto směru činí $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$. [9]

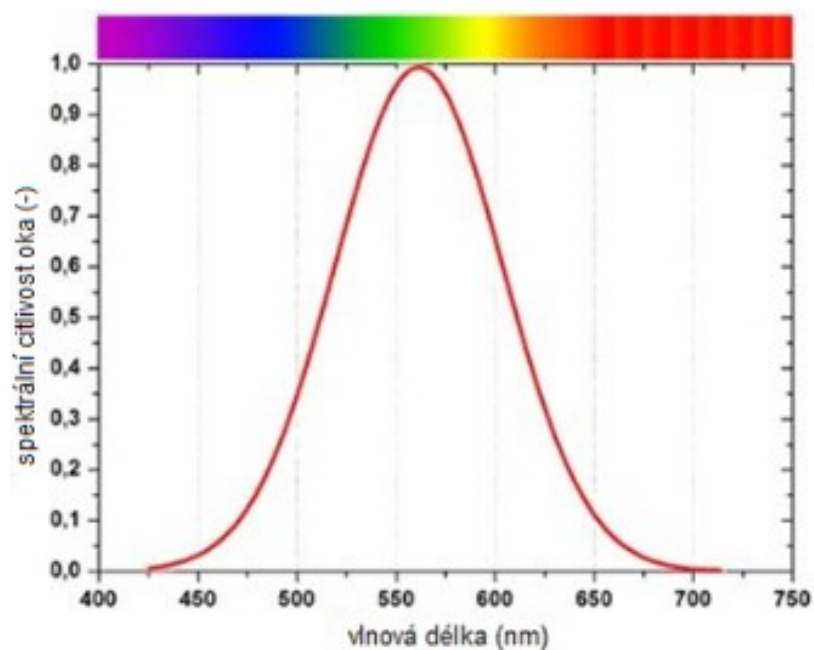
3.5 Vztah mezi objektivními a subjektivními jednotkami

Můžeme z daného zářivého toku ve wattech spočítat světelný tok v lumenech, pokud známe **energetické spektrum** $I_{en}(\lambda)$ a **fotometrickou křivku** $V(\lambda)$.

A naopak stejným způsobem můžeme ze znalosti energetického spektra $I_{en}(\lambda)$ (energetické ozáření) ve $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ spočítat osvětlení E v luxech podle vztahu:

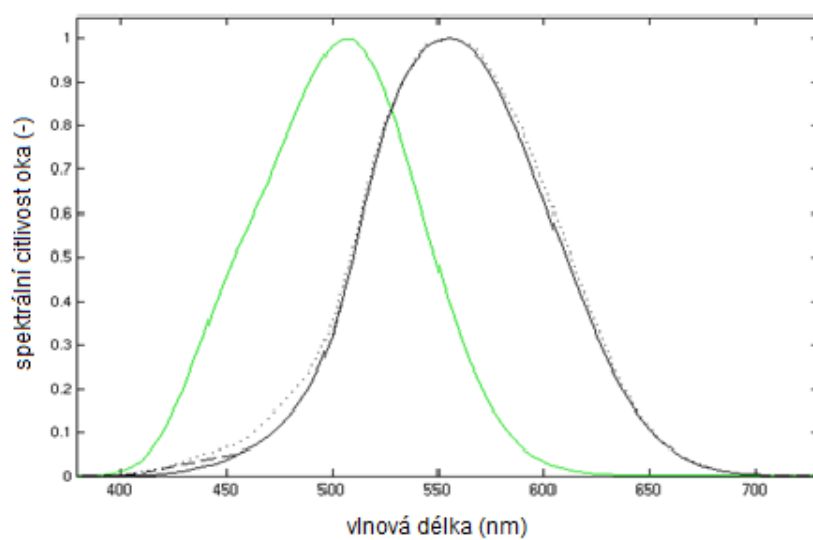
$$E = 683 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{en}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

Fotometrická křivka $V(\lambda)$ pro tzv. **fotopické vidění** (na světle) je definována jako mezinárodní standard. Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) stanovila tyto křivky pro tzv. normálního fotometrického pozorovatele.



Obr. 9: Fotometrická křivka pro fotopické vidění [27]

Křivka pro skotopické vidění (za šera) je posunuta ke kratším vlnovým délkám a má maximum kolem 510 nm.



Obr. 10: Porovnání fotopické (černá) a skotopické (zelená) fotometrické křivky [9]

Pokud bychom měli monochromatické záření o vlnové délce 555 nm, tak bude jednomu $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ odpovídat osvětlení 683 lx, ale v praxi na danou plochu dopadá světlo o spektru $I_{\text{en}}(\lambda)$ a osvětlení bude menší než 683 lx. [9]

3.6 Vyjádření FAR veličin

Při navrhování osvětlení musíme znát optimálně nebo minimálně účinné intenzity fotosynteticky aktivního záření pro vybrané rostliny. Tyto hodnoty vyjadřujeme buď jako intenzita ozáření ve spektrálním pásmu 400 až 700 nm ($\text{W}_{\text{FAR}} \cdot \text{m}^{-2}$), nebo jako intenzita toku fotonů v pásmu FAR, sdílených molekulám 1 mikromolu aktivních látek (CO_2 , H_2O) vstupujících do procesu asimilace. Fyzikální jednotkou intenzity toku fotonů je $\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, ale je zavedena jednotka $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, kterou používají mimo jiné i výrobci světelných zdrojů určených k přisvětlování skleníkových rostlin. Vzájemný vztah obou jednotek vyplývá z následujících rovnic:

$$E_{\text{FAR}} = \int_{400\text{nm}}^{700\text{nm}} e_{\lambda} d\lambda \quad (6)$$

$$E_{\text{mol}} = \frac{1}{119,64} \int_{400\text{nm}}^{700\text{nm}} e_{\lambda} \lambda d\lambda \quad (7)$$

kde e_{λ} ...je spektrální intenzita ozáření ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)

E_{FAR} ...intenzita ozáření ve spektrálním pásmu 400 až 700 nm ($\text{W}_{\text{FAR}} \cdot \text{m}^{-2}$)

E_{mol} ...intenzita fotonového toku ve spektrálním pásmu 400 až 700 nm ($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

λ ...vlnová délka (nm)

Obě hodnoty jsou závislé na spektrálním složení záření světelných zdrojů, a proto nemají k sobě konstantní poměr a samozřejmě nejsou v konstantním poměru ani s fotometrickými jednotkami. Vztah energetických nebo kvantových jednotek k fotometrickým jednotkám značně závisí na emisním spektru světelných zdrojů.

Výpočet fotometrických hodnot intenzity osvětlení:

$$E_{lx} = \frac{1000E_{FAR}}{k_{FAR}} \quad (8)$$

$$E_{lx} = \frac{1000E_{mol}}{k_{mol}} \quad (9)$$

kde E_{lx} ...výpočtové hodnoty intenzity osvětlení (lx)

E_{FAR} ...požadovaná hodnota intenzity ozáření ($W_{FAR} \cdot m^{-2}$)

E_{mol} ...požadovaná hodnota kvantové ozářenosti ($\mu mol \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$)

k_{FAR} ...přepočítávací činitel energetických jednotek ($W_{FAR} \cdot m^{-2}/klx$)

k_{mol} ... přepočítávací činitel kvantových jednotek ($\mu mol \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}/klx$)

Kromě kvantové ozářenosti jsou dále často používány i další kvantové (fotonové) jednotky jako fotonový tok s jednotkou zpravidla $\mu mol \cdot s^{-1}$. Kvantové jednotky jsou závislé na vlnové délce záření (λ). Ve většině případech platí, že: [13]

$$1 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} = 0,20 \text{ až } 0,24 W \cdot m^{-2}$$

4 Vytvoření metodiky pro výpočet PPF

Jedním z cílů této práce je vytvořit metodiku pro zjištění chování různých zdrojů světla pro křivku relativní spektrální citlivosti na FAR, takže jedním z prvních kroků je podívat se z blízka na tu to křivku.

Jak už bylo řečeno, spektrální citlivost rostlin se liší od spektrální citlivosti lidského oka. Lidské oko vnímá světlo jako viditelné záření v rozsahu vlnových délek od 380 do 780 nm, přičemž má nejvyšší citlivost na světlo při 555 nm. Záření s touto vlnovou délkou se projevuje jako velmi jasné. Záření s kratšími nebo delšími vlnovými délkami musí být mnohem silnější, aby způsobilo podobně silný vjem z jasu. Co se týká měření světla, lidé obvykle používají fotometrické jednotky jako je lux (lx) a lumen (lm). Vzhledem k tomu, že tyto jednotky jsou odvozeny od vnímání jasu lidského oka, je jejich použití pro rostliny užitečné pouze v omezeném rozsahu.

Rostliny vnímají světlo jiným způsobem než lidé. Pro posouzení světelného zdroje, pokud jde o jeho vhodnost pro osvětlení rostlin, je lepší určit množství fotosyntetického aktivního záření (FAR). To je rozsah vlnových délek mezi 400 a 700 nm, který rostliny používají pro fotosyntézu. Rostliny jsou také citlivější pro určité vlnové délky v rozsahu FAR a kromě toho rozpoznávají UV záření (pod 400 nm) a infračervené záření (nad 700 nm) a reagují na ně. Také složení světla, tzn. poměr vlnových délek k sobě má vliv na růst rostlin.

Celkový výkon FAR zdroje světla se nazývá fotosyntetický fotonový tok (PPF) a udává se v mikromolech za sekundu ($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$). Výzkumem na univerzitách a výzkumných institucích bylo dokázáno, že rychlost fotosyntézy závisí na počtu fotonů v rozsahu FAR. Jedná se o jediný spolehlivý způsob měření, zda je světelný zdroj vhodný pro fotosyntézu. Čím vyšší je hodnota PPF na watt, tím účinnější je zdroj pro růst rostlin. Z tohoto důvodu je hodnota PPF specifikována pro všechny zdroje světla určené pro potřeby rostlin. Abychom určili, kolik z celkového PPF dosáhne povrchu, je zapotřebí znát fotosyntetickou hustotu fotonového toku (PPFD), která se určuje kvantovými senzory. Kvantové senzory zaznamenávají množství fotonů, které zasáhly povrch za sekundu, jednotkou PPFD je $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Kvalitní kvantové snímače berou v úvahu energetický obsah fotonů, který se liší mezi vlnovými délkami. Čím kratší je vlnová délka, tím vyšší je energetická hladina, čím delší je vlnová délka, tím nižší je hladina energie fotonů. S jedním wattem energie může být generováno

dvakrát více fotonů ve spektru červené barvy než fotonů ve spektru modré barvy. Rostliny tedy využívají červené světlo mnohem efektivněji. [14], [15]

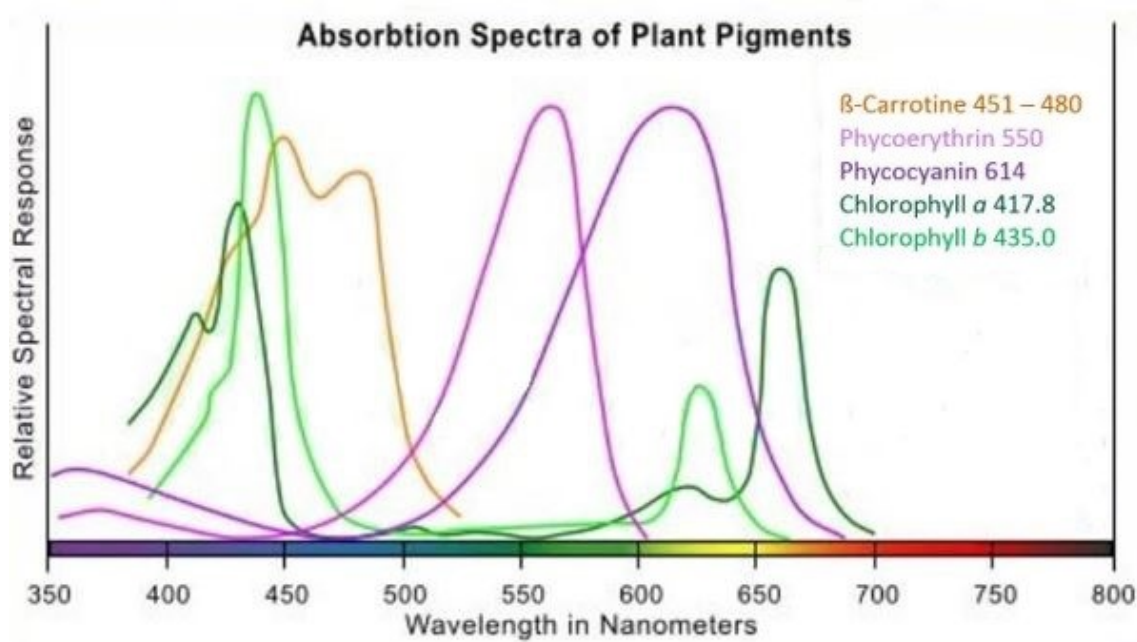
4.1 Křivky pro kvantifikaci spektra světla ke kultivaci rostlin

Rostliny využívají světlo, což je forma energie, pro výrobu potravy prostřednictvím procesu fotosyntézy. Spektrální složení světla rostliny využívají k aktivaci pigmentových buněk (barevných buněk v rostlině). Světlo ovlivňuje vývoj rostlin, jako je velikost, poměr výhonků ke kořenům, kvetení / plody atd.

Spektrum typicky používané rostlinami je kromě FAR, také v oblasti mezi 380 nm a 400 nm (UVA / tmavě modrá) a mezi 700 nm a 750 nm (infrachervené světlo).

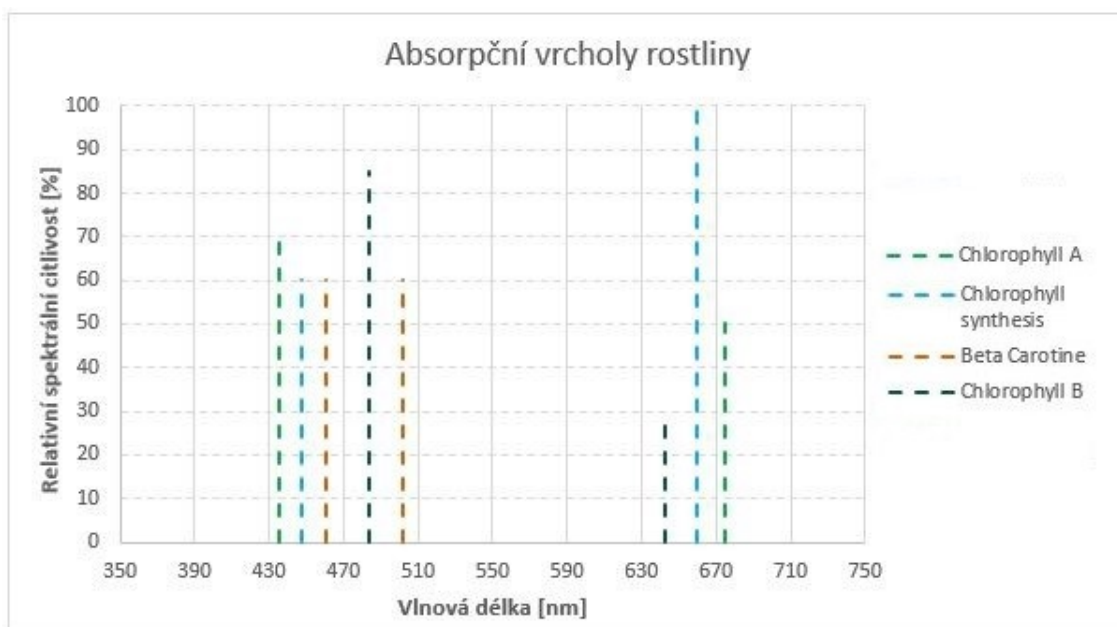
V rámci spektra FAR mají různé pigmenty a fotosenzitivní sloučeniny v rostlinách špičkovou absorpci v různých množstvích a při různých vlnových délkách (barvách), většinou v modré a červené oblasti spektra. Většina zeleného světla se odráží zpátky k oku, což je důvod, proč rostliny vypadají zeleně.

Následující obrázek ukazuje různé absorpční píky hlavních fotosenzitivních látek v rostlinách, které vyžadují světlo:



Obr. 11: Absorpční spektrum rostlinných pigmentů [16]

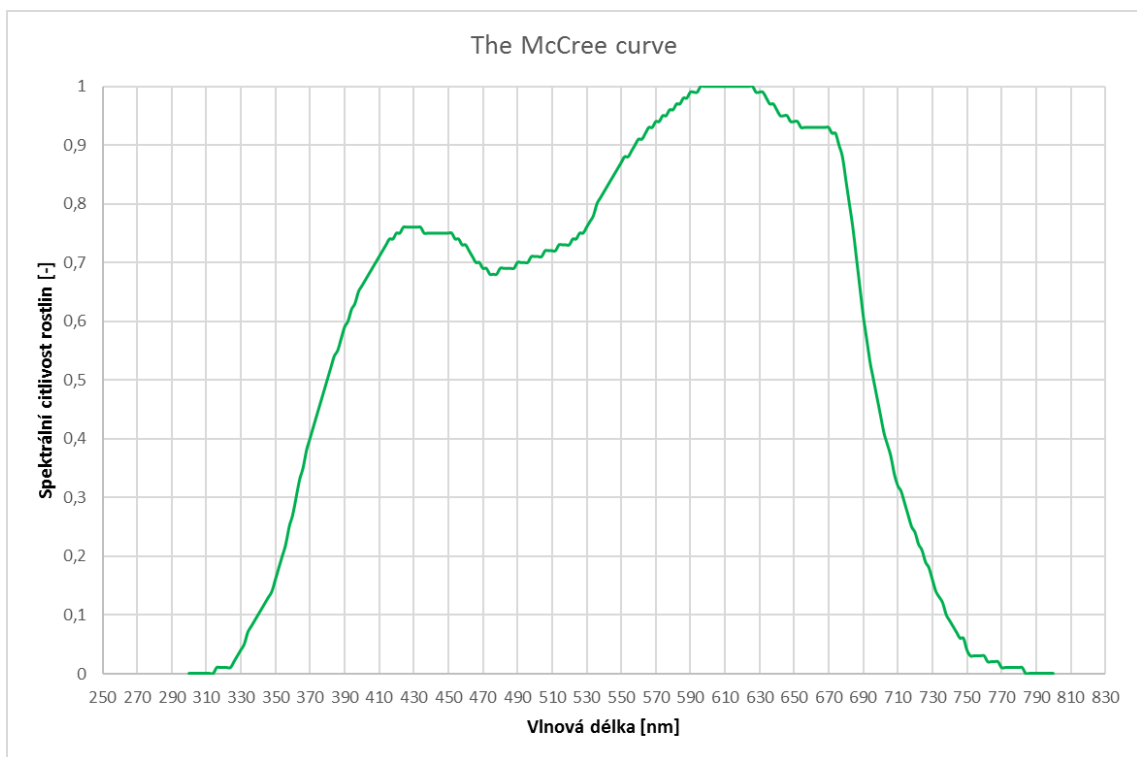
Většinou se berou v úvahu hlavní fotosenzitivní látky v rostlinách. Jsou to chlorofyl A, chlorofyl B, beta karoten a syntéza chlorofylu. To neznamená zmenšení významu jiných látek, ale používá se to pouze z důvodu zjednodušení diagramů. Zde je zjednodušený obrázek vrcholů absorpce rostlin: [16]



Obr. 12: Absorpční vrcholy rostliny [16]

4.1.1 Křivka relativní spektrální citlivosti na FAR (The McCree curve)

Dr. Keith McCree vytvořil na začátku sedmdesátých let podrobnou práci o absorpci světla rostlin. Měření byla provedena tak, aby poskytla základ pro diskusi o definici fotosynteticky aktivního záření, bylo zkoumáno akční spektrum, absorpce a spektrální kvantový výnos spotřeby CO₂. Byly měřeny listy 22 druhů plodin v rozmezí vlnových délek 350 až 750 nm. Byly brány v potaz různé faktory jako například: druh, odrůda, věk listu, podmínky růstu (na poli nebo v růstové komoře). Na následující straně je vykreslena McCreeho křivka.



Obr. 13: The McCree curve [17]

Křivka McCree je průměrnou křivkou absorpce světla z různých druhů rostlin. Jednotlivé druhy rostlin budou mít mírně odlišné křivky absorpce světla. Například listová zelená rostlina, jako je hlávkový salát, dává přednost modrému světlu, zatímco kvetoucí a plodící rostliny jako jsou rajčata, okurky a chilli preferují více červeného světla. [16], [17], [20]

4.1.2 Křivka PAR

Křivka PAR je nejstarší a stále nejoblíbenější způsob určení světla, které rostliny potřebují.

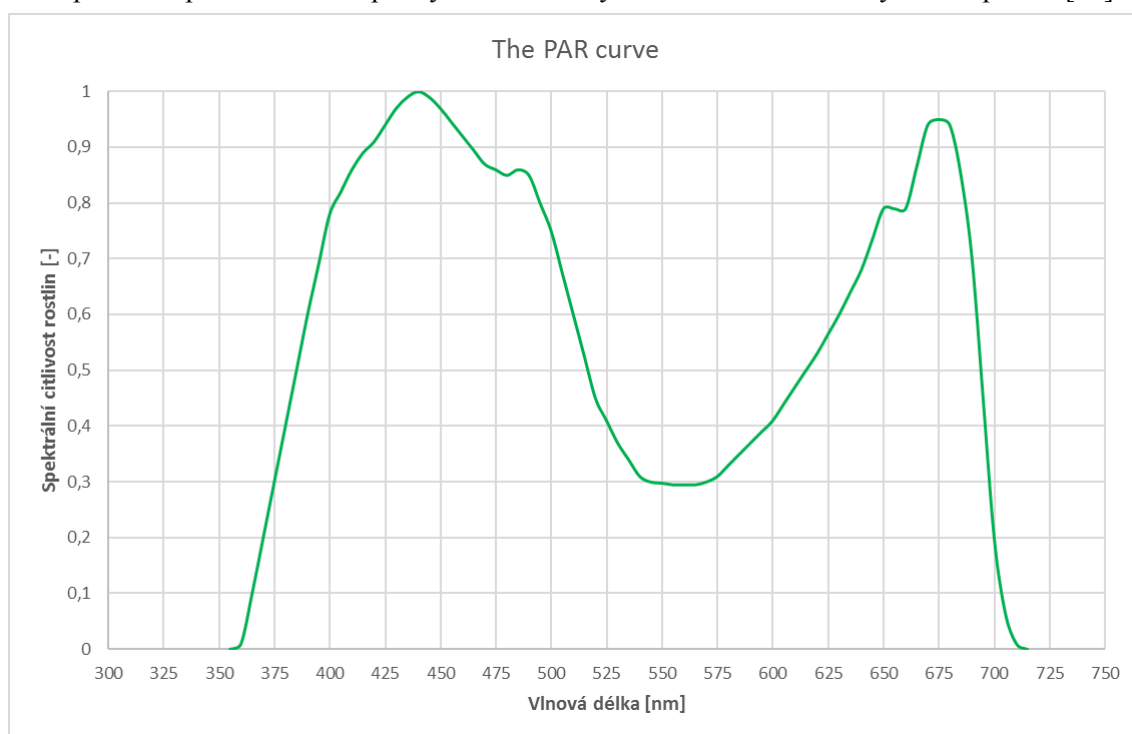
Tato křivka je průměrnou potřebou absorpce světla rostlin. Ve skutečnosti mají různé rostliny mírně odlišné PAR křivky, protože různé druhy rostlin absorbují světlo různými způsoby. Křivka PAR je tedy průměr PAR křivek z řady různých typů rostlin.

Křivka má svůj vrchol (100 %) v oblasti modré barvy kolem 440 nm a další nižší vrchol, je v červené oblasti kolem 675 nm. Z křivky jde vypočítovat, že v oblasti zelené barvy nabývá

malých hodnot, zhruba od 540 do 570 nm. Světla v této oblasti rostliny moc nevyužívají, ale odráží ho. To je ten důvod, proč většina rostlin vypadá zeleně, zatímco modré a červené světlo je vstřebáváno rostlinami pro získání živin.

I když ve slunečním spektru není modrá barva obsažena tak bohatě jako oranžová/červená, přesto ji rostliny potřebují, jelikož je na vyšší energetické hladině díky kratším vlnovým délkám. Rostliny využívají červenou část spektra, i když je na menší energetické hladině, protože oranžové/červené vlnové délky jsou ve velkém množství dostupné ve slunečním spektru.

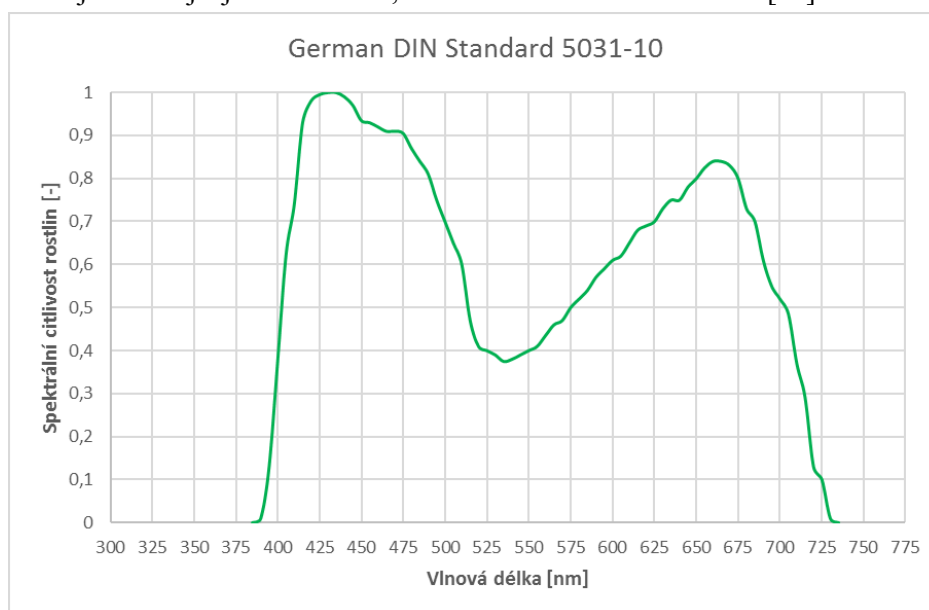
Modrou část spektra používají rostliny pro kořen, stonek a tvorbu listů, zatímco červená část spektra se používá hlavně pro syntézu chlorofylu a ve fázi kvetení a vytváření plodu. [16]



Obr. 14: The PAR curve [16]

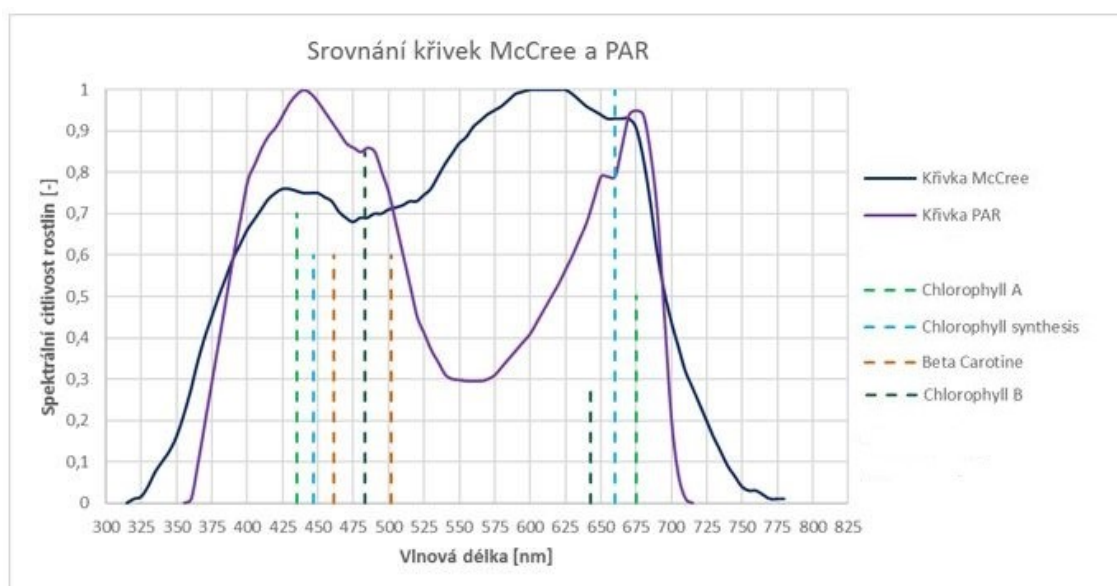
4.1.3 Křivka DIN Standard 5031-10

Německá křivka DIN Standard 5031-10 je poněkud podobná křivce PAR, ale není široce využívána. Nejoblíbenější je křivka PAR, následovaná křivkou McCree. [16]



Obr. 15: German DIN Standard 5031-10 [16]

4.1.4 Srovnání křivek McCree a PAR



Obr. 16: Srovnání křivek McCree a PAR [16]

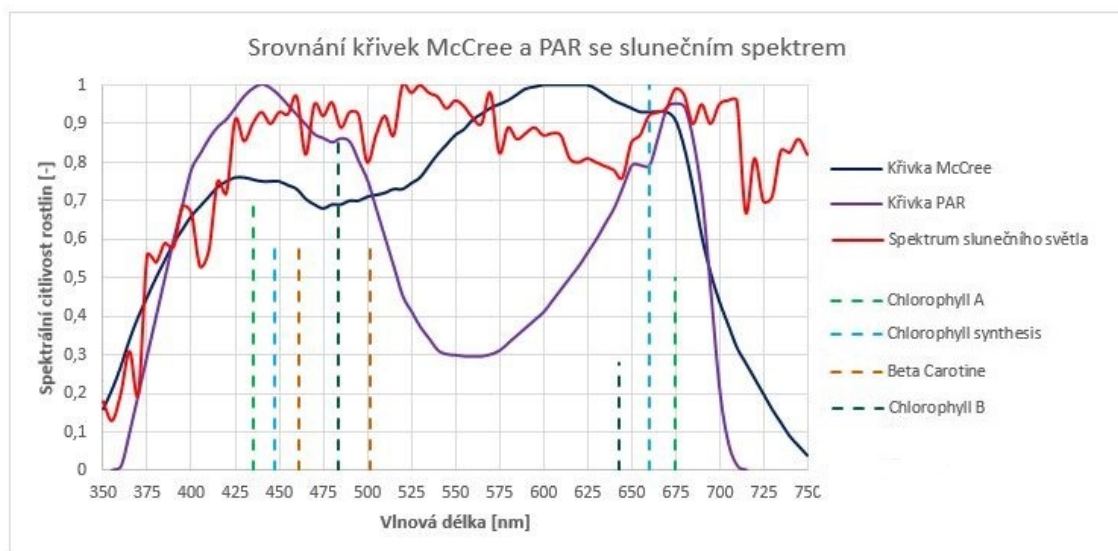
Výše uvedený obrázek znázorňuje srovnání křivky McCree a křivky PAR a také absorpční vrcholy rostliny.

Zatímco křivka DIN a křivka PAR jsou si poněkud podobné, křivka McCree je zcela odlišná od křivky PAR. Křivka McCree ukazuje ve srovnání s křivkou PAR, že rostliny potřebují více UV záření, méně modré světlo, více využívají světlo v oblasti 520 nm (zelené) až 620 nm (oranžové) a také potřebují méně tmavé červené světlo ve srovnání s křivkou PAR. [16]

4.1.5 Sluneční světlo

Srovnání křivek McCree a PAR se slunečním spektrem je užitečné, jelikož sluneční světlo je přirozeným a nejvíce převládajícím zdrojem světla pro rostoucí rostliny. Všechny ostatní umělé zdroje pro kultivaci rostlin se v podstatě, ve větší či menší míře, snaží napodobit sluneční světlo.

Následující obrázek znázorňuje křivku McCree, křivku PAR a část spektra (350 nm až 750 nm) slunečního světla v poledne (plná červená čára) při průchodu atmosférou. Jak jde vidět, tak křivka McCree ani křivka PAR, tak úplně neodpovídají slunečnímu světlu.



Obr. 17: Srovnání křivek McCree a PAR se slunečním spektrem [16]

Ze srovnání křivek lze vypožorovat, že sluneční světlo poskytuje množství zeleného až žlutého světla v rozmezí 520 až 590 nm, přestože rostliny potřebují jen velmi málo těchto vlnových délek. Tento, řekněme „nadbytek“ vlnových délek, není pro rostliny problém, protože absorbují jen tolik světla, kolik potřebují v modré, zelené, žluté, oranžové a červené vlnové délce a zbytek jednoduše ignorují. U umělého světla pro potřeby rostlin se snažíme vytvořit spektrum, které zapadá co nejlíp do křivky McCree nebo křivky PAR, protože jakékoliv přebytké světlo nebo světlo vyrobené mimo spektrum McCreeho nebo PAR křivky, je světlo zbytečné.

Toto „zbytečné“ světlo představuje energii, která se používá k produkci tohoto světla, které rostliny nepotřebují, čímž se snižuje celková účinnost rostliny/růstového světla.

Na základě těchto informací, můžeme tedy vyčíst, že pro správný růst rostlin by umělý zdroj světla měl produkovat především modré a červené světlo s křivkou spektrální intenzity, která odpovídá křivce McCree nebo křivce PAR co nejbližší. Jak už bylo řečeno, tak rostliny v klíčivé a vegetační fázi jejich růstu potřebují více modrého (vysokoenergetického) světla, zatímco rostliny v počáteční/kvetoucí/plodové fázi potřebují více červeného (nízkoenergetického) světla.

Aby tato problematika nebyla tak jednoduchá, tak některé druhy rostlin, například listový salát (*Lactuca sativa* L.), nevyžadují mnoho červeného světla, ale vyžadují určité UV záření během určitých fází růstového cyklu. Neexistuje tedy žádný typ rostlinného světla, který by vyhovoval potřebám všech druhů rostlin pěstovaných pod umělým osvětlením. To vedlo k rozšíření mnoha typů svítidel určených pro různý vývoj rostlin, které byly navrženy tak, aby spolupracovaly se specifickými typy rostlin. [16]

4.2 Výpočet fotosyntetického fotonového toku (PPF)

Po seznámení se s křivkami pro spektrální citlivost rostlin bylo zapotřebí vypočítat fotosyntetický fotonový tok ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$). Fotosyntetický fotonový tok se odvozuje vyhodnocením záření vyzářeného zdrojem podle jeho působení na základě křivky relativní spektrální citlivosti na FAR (McCree, PAR, DIN):

$$PPF = K \int_{\lambda=300nm}^{\lambda=800nm} \Phi_{\lambda} \cdot RQE(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

kde K ...citlivost rostlin ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$)

Φ_{λ} ...zářivý tok vycházející ze zdroje (W)

RQE ...reprezentuje relativní spektrální citlivost na FAR (-)

V předcházejícím vztahu máme jedinou neznámou a tím je citlivost rostlin K . Ostatní veličiny známe, protože zářivý tok si vezmeme od výrobce a křivka relativní spektrální citlivosti na FAR je nám už známá. V následující kapitole bude odvozena citlivost K . [18], [19]

4.2.1 Odvození citlivosti rostlin

U lidského oka je převod mezi fotometrickou a energetickou jednotkou 683 lm/W, což je měrný světelný výkon. U rostlin je převod jiný a tato citlivost rostlin by se dala nazvat jako měrný fotoaktivní výkon a bude v této kapitole odvozena. Při odvození budeme vycházet ze vztahu pro výpočet energie fotonu z jeho vlnové délky. Nejprve si vyjádříme energii fotonu:

$$E_f = h \cdot \nu \quad (11)$$

kde E_f ...energie fotonu (J)

h ...Planckova konstanta = $6,62606957 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$

ν ...frekvence fotonu (Hz)

Tato rovnice popisuje přenášení energie v kvantech, ale musíme do této rovnice zakomponovat vlnovou délku. Vyjdeme z vlnové rovnice, která popisuje rychlost světla z hlediska vlnové délky a frekvence:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (12)$$

kde c ...rychlost světla ve vakuu = $2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

λ ...vlnová délka (m)

ν ...frekvence (Hz)

Z předešlé rovnice pro rychlost světla si odvodíme frekvenci ν :

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (13)$$

Dále se vymění z první rovnice frekvence ν za $\frac{c}{\lambda}$ a dostaneme vzorec, který můžeme použít:

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (14)$$

Potřebujeme odvodit rovnici, která bude vztahovat intenzitu záření světla na množství fotonového toku v $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ jako funkce vlnové délky λ :

$$K = \frac{h \cdot c \cdot N_A \cdot 10^{-6}}{\lambda \cdot 10^{-9}} \quad (15)$$

kde N_A ...Avogadrova konstanta = $6.0221413 \cdot 10^{23}$

$N_A \cdot 10^{-6}$... Avogadrova konstanta pro μmol

$\lambda \cdot 10^{-9}$...vlnová délka v nm

Avogadrova konstanta vyjadřuje počet částic v jednom molu. Jelikož potřebujeme množství fotonového toku v μmol , tak jsme Avogadrovu konstantu vynásobili 10^{-6} a vlnovou délku potřebujeme v nm, takže bylo zapotřebí vynásobit vlnovou délku 10^{-9} . Dosadíme do rovnice a dostáváme: [19], [21]

$$K = \frac{6,62606957 \cdot 10^{-34} \cdot 2,99792458 \cdot 10^8 \cdot 6,0221413 \cdot 10^{23} \cdot 10^{-6}}{\lambda \cdot 10^{-9}} = 119,626566$$

Položením této hodnoty jedničky dostaneme citlivost rostlin:

$$119,626566 \rightarrow \frac{1}{119,626566} = \mathbf{0,00835935 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}}$$

4.3 Vytvoření metodiky pro výpočet PPF v programu MS Excel

Dalším krokem pro vytvoření metodiky pro zjištění chování různých zdrojů světla pro křivku relativní spektrální citlivosti na FAR je zjištění spektrálního přenosu záření do rostlin. Bylo zapotřebí obsáhnout celé barevné spektrum a k tomu jsem zvolil osm diod od Osramu, které jsou v následující tabulce.

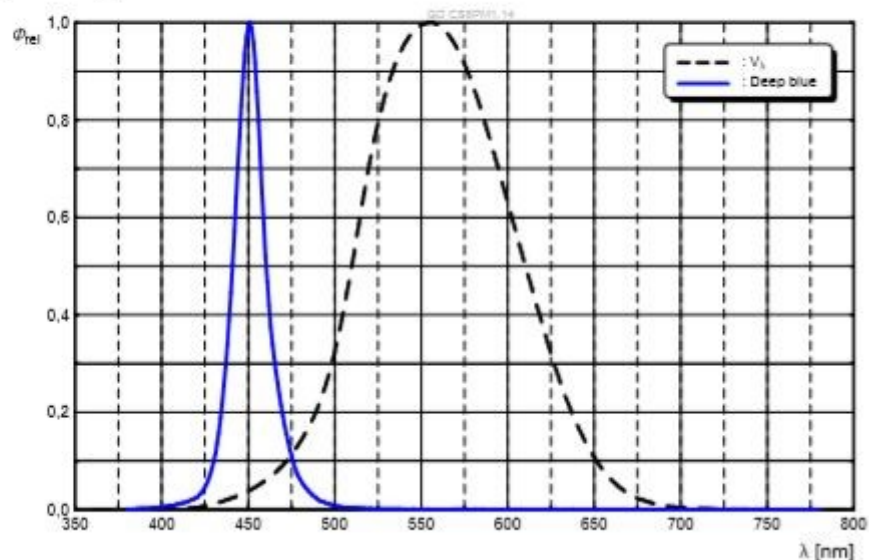
Tab. 2: Zvolené diody od Osramu

	Units	Deep Blue	Blue	True Green	Yellow
		GD CS8PM1.14	GB CS8PM1.13	GT CS8PM1.13	GY CS8PM1.23
Wavelength λ peak	nm	451	465	528	590
Dominant wavelength	nm	449 - 461	464 - 476	513 - 537	583 - 595
Radiation Angle 80°	[°]	80°	80°	80°	80°
typ. Rth	K/W	4.6 K/W	7 K/W	7 K/W	7 K/W
Max. current	mA	1000	1000	1000	1000
Typ. Forward voltage Vf	V	2,95	2,85	3,35	2,2
	mA	350	350	350	350
Pracovní proud	mA	350	350	350	350

	Units	Amber	Red	Hyper Red	Far Red
		GA CS8PM1.23	GR CS8PM1.23	GH CS8PM1.24	GF CS8PM2.24
Wavelength λ peak	nm	625	623	660	730
Dominant wavelength	nm	612 - 624	620 - 632	646 - 666	730 (peak)
Radiation Angle 80°	[°]	80°	80°	80°	80°
typ. Rth	K/W	7 K/W	7 K/W	4.8 K/W	7 K/W
Max. current	mA	1000	1000	1000	1000
Typ. Forward voltage Vf	V	2,1	2,1	2,15	1,85
	mA	350	350	350	350
Pracovní proud	mA	350	350	350	350

Po výběru diod jsem v jejich datasheetech našel jejich relativní spektrum vyzařování. Maximální hodnoty byly vždy na jedničce (100%), tak jsem musel přepočítat tyto relativní hodnoty na hodnoty pro relativní spektrální citlivost na FAR (použil jsem křivku McCree), jinak řečeno maximální hodnoty jednotlivých diod jsem zvolil takové, aby odpovídaly křivce McCree na daném nm. Po této úpravě křivek relativního spektrálního vyzařování diod jsem tyto hodnoty zapsal do MS Excelu [11]. Na další stránce vidíme ukázkou z datasheetu pro relativní spektrální vyzařování diody deep blue.

Relative Spectral Emission - $V(\lambda)$ = Standard eye response curve 5) page 21
 Relative spektrale Emission - $V(\lambda)$ = spektrale Augenempfindlichkeit 5) Seite 21
 $\Phi_{rel} = f(\lambda)$; $T_S = 25^\circ\text{C}$; $I_F = 350\text{ mA}$



Obr. 18: Relativní spektrální vyzařování diody deep blue z datasheetu

Po zapsání relativního vyzařování osmi diod do MS Excelu, jsem provedl sumu tohoto vyzařování pro jednotlivé diody, protože bylo zapotřebí vztáhnout toto relativní vyzařování na celé vyzařované spektrum diody ve watttech na nanometr. Nejprve bylo důležité vypočítat přepočítávací konstantu K , abych celkový vyzařovaný výkon diody obsáhl do spektra relativního vyzařování. Přepočítávací konstantu jsem vypočítal vydělením celkového vyzářeného výkonu diody (u diody deep blue je celkový vyzářený výkon $0,69\text{ W}$) a sumy relativního spektrálního vyzařování diody (u diody deep blue má suma hodnotu $5,0047$).

$$K = \frac{P}{\Phi_{rel}} = \frac{0,69}{5,0047} = 0,138 \quad (16)$$

Po vypočítání přepočítávací konstanty jsem ji vynásobil spektrálním relativním vyzařováním při každé vlnové délce. Získal jsem spektrální hodnoty záření diody ve W/nm , kde jejich součtem by se mělo dosáhnout celkového vyzářeného výkonu diody. Pro kontrolu jsem provedl sumu nově vzniklého sloupce v MS Excelu [11], který obsahuje vypočítané spektrální záření diody ve W/nm a dostal jsem celkový vyzářený výkon diody $0,69\text{ W}$, takže kontrola

ukázala správnost výpočtu. Pro získání spektrálního přenosu záření do rostlin už jen zbývá vynásobit hodnoty spektrálního záření diody s křivkou McCree při každé vlnové délce. V Tab. 3 jsou graficky znázorněny tyto výpočty na jednom řádku. V tabulce si lze všimnout velkého skoku ve sloupci vlnové délky z 455 na 525 nm, což je zapříčiněno srolováním pár řádků, kvůli omezení velikosti stránky a přehlednější prezentaci.

Tab 3: Ukázka výpočtů pro diodu deep blue [11]

The McCree curve		Deep Blue (380 až 525 nm)		
Vlnová délka	Spektrální citlivost rostlin	Φ_{rel}	Φ_{rel}	Spektrální přenos záření do rostlin
[nm]	[-]	[-]	[W/nm]	[W/nm]
380	0,5	0,01	0,001378704	0,000689352
385	0,545	0,01	0,001378704	0,000751394
390	0,59	0,01	0,001378704	0,000813435
395	0,625	0,0112	0,001544149	0,000965093
400	0,66	0,0115	0,00158551	0,001046436
405	0,685	0,0125	0,00172338	0,001180515
410	0,71	0,015	0,002068056	0,00146832
415	0,735	0,023	0,003171019	0,002330699
420	0,75	0,033	0,004549723	0,003412292
425	0,76	0,05	0,00689352	0,005239075
430	0,76	0,08	0,011029632	0,00838252
435	0,755	0,3	0,041361121	0,031227646
440	0,75	0,49	0,067556497	0,050667373
445	0,75	0,68	0,093751873	0,070313905
450	0,75	0,75	0,103402801	0,077552101
455	0,74	0,75	0,103402801	0,076518073
525	0,745	0,01	0,001378704	0,001027134
530	0,76	Suma	Pro kontrolu:	Suma
535	0,79	5,0047	Suma = 0,69 W/nm	0,505855121
540	0,82	ΔP [W]		
545	0,845	0,69	$K = 0,69 \text{ W} : 5,0047 = 0,137870402$	
550	0,87	K	$0,093751873 = K \cdot 0,68$	
555	0,885	0,137870402	$0,070313905 = 0,093751873 \cdot 0,75$	

Výpočty v tabulce nad tímto textem se musí provést pro zbývajících sedm diod.

Ted' už lze konečně vypočítat fotosyntetický fotonový tok v $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$. Stačí vynásobit citlivost s hodnotou $0,00835935 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ se sumou spektrálního přenosu záření do rostlin a dostaneme fotosyntetický fotonový tok (PPF) pro danou diodu.

$$0,00835935 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1} \cdot 0,506 \text{ W/nm} \cdot 10^3 = 4,23 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$$

Při výpočtu PPF je třeba dávat pozor na to, že výsledek vychází v MS Excelu [11] v $\text{nmol} \cdot \text{s}^{-1}$, ale potřebuji ho v $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$, proto jsem do vzorce přidal konstantu 10^3 .

Pro výpočet PPF jednotlivých světelných zdrojů tedy stačí znát jejich vyzářený výkon. Tento vyzářený výkon ve wattech vynásobíme citlivostí rostlin a křivkou relativní spektrální citlivosti na FAR (křivka McCree) na jedné vlnové délce.

$$PPF = P \cdot K \cdot RQE_{(\lambda)} \quad (17)$$

kde P...Vyzářený výkon světelného zdroje (W)

K... citlivost rostlin ($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$)

$RQE_{(\lambda)}$... Relative quantum efficiency (křivka relativní spektrální citlivosti na FAR)

Při porovnání vypočítaných hodnot PPF v programu MS Excel [11] a změřených výrobcem vidíme největší odchylky na krajích viditelného světla u diod deep blue a far red.

Tab. 4: Srovnání vypočteného a změřeného PPF [11]

PPF	Deep Blue	Blue	True Green	Yellow	Amber	Red	Hyper Red	Far Red
[$\mu\text{mol/s}$]								
Od výrobce	3,06	2,25	0,98	0,48	1,91	1,99	2,93	1,88
Kalkulovaný	2,6	2,22	1	0,47	1,91	1,95	2,34	1,65
Můj výpočet	4,23	3,41	1,45	0,78	3,01	3,06	3,29	0,71
Odchylka od výrobce	1,169	0,75	0,47	0,298	1,1	1,07	0,36	1,168

5 Srovnání a optimalizace světelných zdrojů

Pro srovnání byla vybrána vysokotlaká sodíková výbojka Vialox NAV-E 70 W/I E27 a bílá LED GW CS8PM1.PM od výrobce Osram. Cílem je zjistit, jak se tyto zdroje chovají v závislosti na křivce relativní spektrální citlivosti na FAR, provést optimalizaci výkonu na tuto křivku pomocí barevných LED diod a srovnat jejich energetickou náročnost ke vztahu k rostlinám.

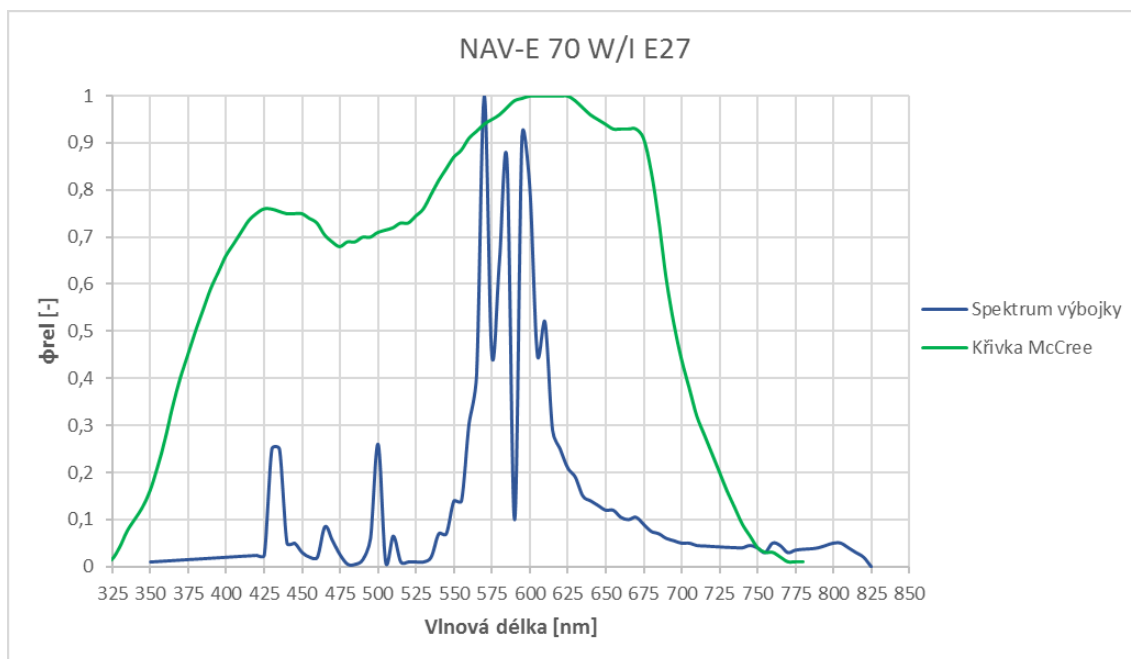


Obr. 19: Vialox NAV-E 70 W (vlevo) a bílá LED GW CS8PM1.PM [28], [29]

Tab. 5: Zvolené diody pro optimalizaci

Osram LEDs	UNIT	Deep Blue	Blue	True Green	Yellow
		GD CS8PM1.14	GB CS8PM1.13	GT CS8PM1.13	GY CS8PM1.23
Working Current (Radiant Flux)	mA	500	500	500	500
U _f typ	V	3,6	3,1	3,14	2,31
Příkon	W	1,8	1,55	1,57	1,155
Účinnost	%	44,1	36,8	14,5	8,2
Wavelength λ peak	nm	451	470	528	590
Dominant wavelength	nm	449 - 461	464 - 476	513 - 537	583 - 595
Výkon	W	0,794	0,571	0,227	0,095
PPF	$\mu\text{mol/s}$	3,06	2,25	0,98	0,48
Osram LEDs	UNIT	Red	Hyper Red	Far Red	
		GR CS8PM1.23	GH CS8PM1.24	GF CS8PM2.24	
Working Current (Radiant Flux)	mA	500	500	500	
U _f typ	V	3,1	2,1	1,85	
Příkon	W	1,55	1,05	0,925	
Účinnost	%	24,1	50,2	33,2	
Wavelength λ peak	nm	623	660	730	
Dominant wavelength	nm	620 - 632	646 - 666	730 (peak)	
Výkon	W	0,374	0,527	0,307	
PPF	$\mu\text{mol/s}$	1,99	2,93	1,88	

5.1 Spektrum výbojky NAV-E 70 W/I E27



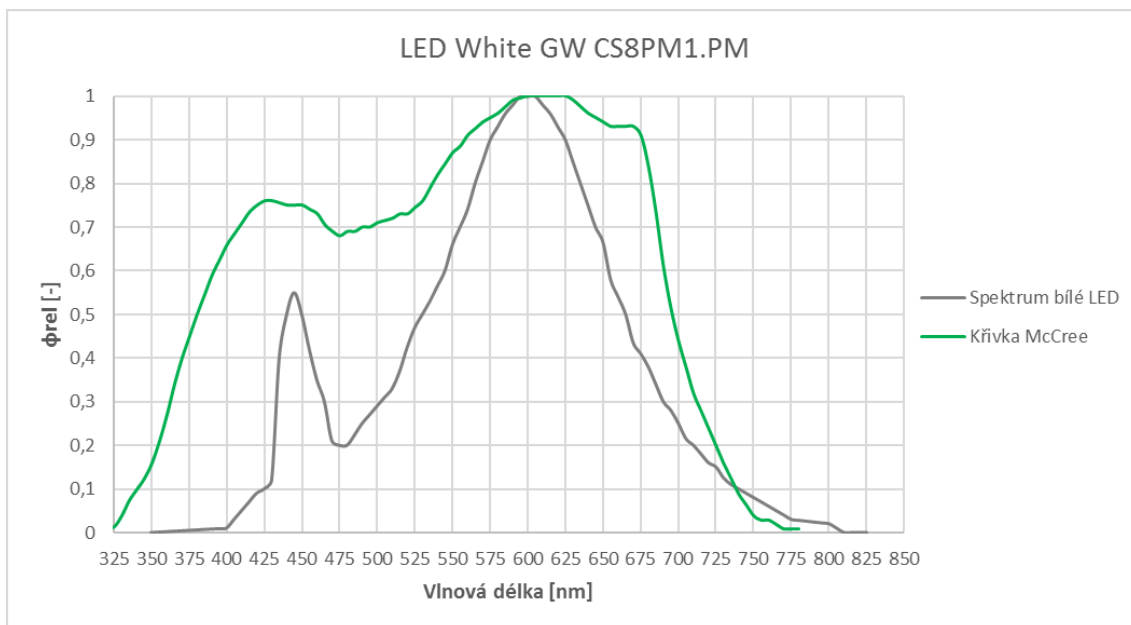
Obr. 20: Spektrum výbojky a křivka McCree

Vysokotlaký sodík je oblíbený typ svítidla pro komerční doplňkové osvětlení v zahradnictví.

Ze srovnání lze vidět, že vysokotlaká sodíková výbojka má malé množství tmavě modré a modré barvy, se spoustou žlutého a zeleného světla. Od oranžové barvy se množství světla začíná zmenšovat a červenou a tmavě červenou barvu už neobsahuje téměř vůbec.

Vysokotlaké sodíkové výbojky mají dlouhou životnost a jsou k dispozici v různých velikostech příkonu a v různých modifikacích pro pěstování rostlin.

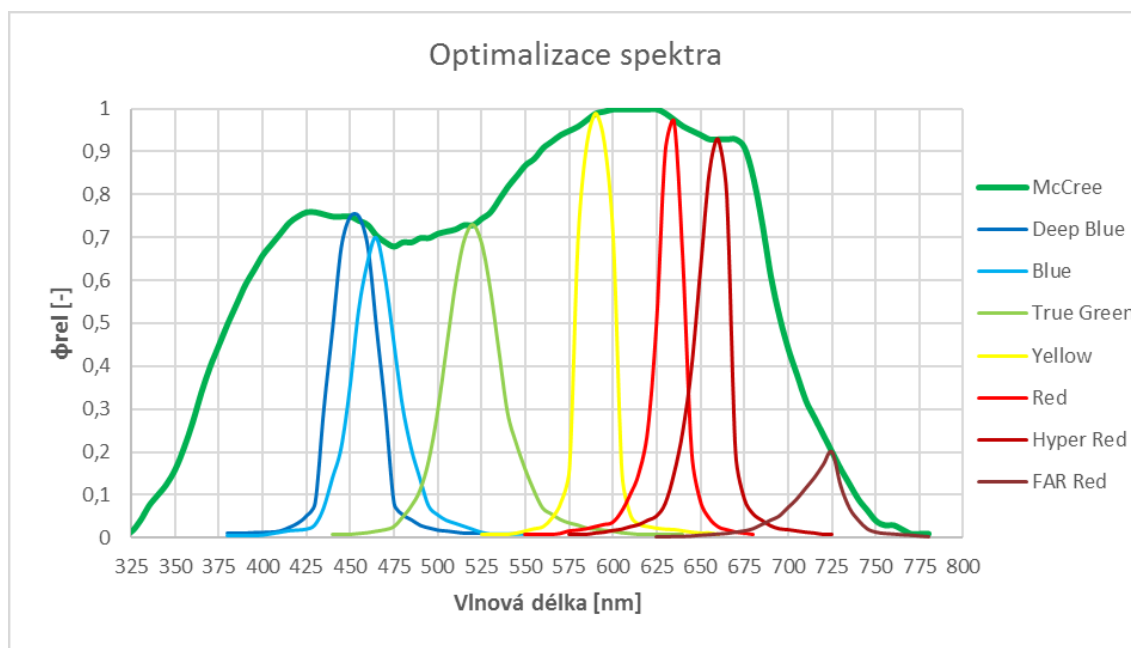
5.2 Spektrum bílé LED GW CS8PM1.PM



Obr. 21: Spektrum bílé LED a křivka McCree

Z obrázku spektrální distribuce světla je jasné vidět, že bílá LED nám dodává alespoň malou intenzitu záření v celém rozsahu vlnových délek FAR. Z průběhu bílé LED můžeme také pozorovat zvýšení intenzity záření v okolí vlnové délky 440 nm a poměrně vysokou intenzitu záření ve žluté, oranžové a v části červeného spektra. Z tohoto důvodu by podle mého názoru mohla být intenzita záření v oblasti žluté, oranžové až červené části spektra dostatečná, ale záleželo by to na konkrétním druhu rostlin, které bychom ozařovali.

5.3 Optimalizované spektrum



Obr. 22: Optimalizace spektra

Cílem optimalizace bylo výkonově naladit zvolené diody na křivku relativní spektrální citlivosti na FAR a vztáhnout je na 1 W neboli aby vybrané diody byl procentuálně naladěny na křivku a součet jejich výkonových příspěvků byl roven 1 W.

Světelné diody (LED) jsou zdrojem úzkopásmového světelného výkonu, které lze použít v řadě zahradnických a fotobiologických aplikací, poskytují příležitost optimalizovat spektra pro danou reakci rostliny. Pro efektivní implementaci LED do komerčních zahradnických výrobních postupů je nutné přizpůsobit spektrální charakteristiky zdroje světla fotosyntetickým a fotomorfogenním požadavkům požadované úrody. Následující tabulka znázorňuje jednotlivé výkonové příspěvky LED diod do křivky McCree:

Tab. 6: Optimalizace podle křivky McCree

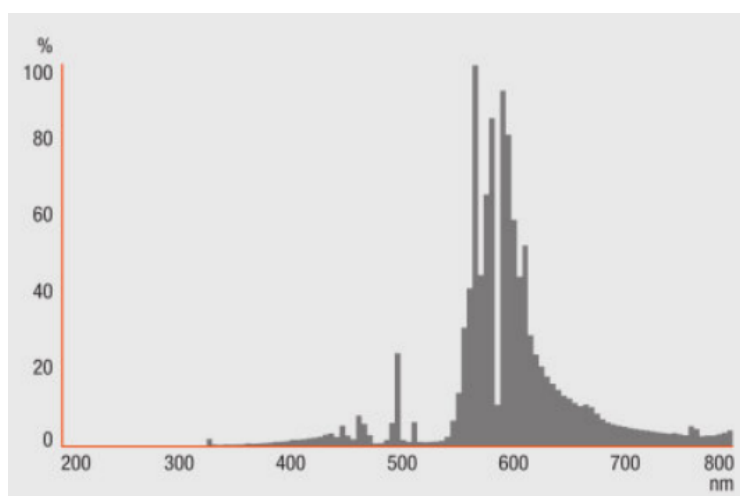
Optimalizace podle křivky McCree	UNIT	Deep Blue	Blue	True Green	Yellow	Red	Hyper Red	Far Red
Procentuální příspěvek podle křivky	%	75	69	76	99	100	93	16
Procentuální příspěvek do křivky v 1 W	%	14,2	13,1	14,4	18,8	18,9	17,6	3
Příspěvky do 1 W do křivky McCree	W	0,142	0,13	0,144	0,188	0,19	0,176	0,03
Příkon	W	0,322	0,36	0,993	2,29	0,78	0,351	0,09

5.4 Srovnání parametrů

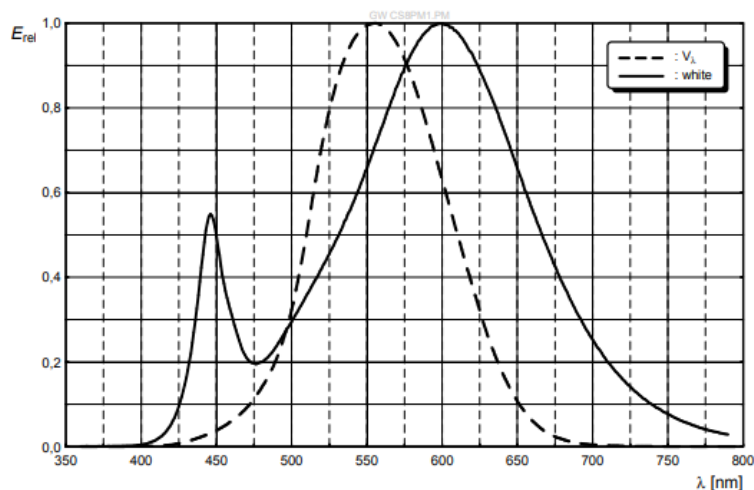
Pro srovnání parametrů vybraných světelných zdrojů (vysokotlaké sodíkové výbojky, bílé LED a barevných diod pro optimalizaci) je nejideálnější vztáhnout tyto parametry na příkon 1 W. U sodíkové výbojky ani u bílé LED, ale není udáván výkon vyzářený do spektra a ani účinnost není známa, takže je potřeba vypočítat vyzářený výkon z příkonu. Metodika tohoto výpočtu bude popsána v následující kapitole.

5.4.1 Metodika výpočtu vyzářeného výkonu z příkonu světelného zdroje

Pro získání hodnoty vyzářeného výkonu z příkonu světelného zdroje bylo prvním krokem najít v datasheetu a přepsat do programu MS Excel [12] relativní spektrum vyzářování.

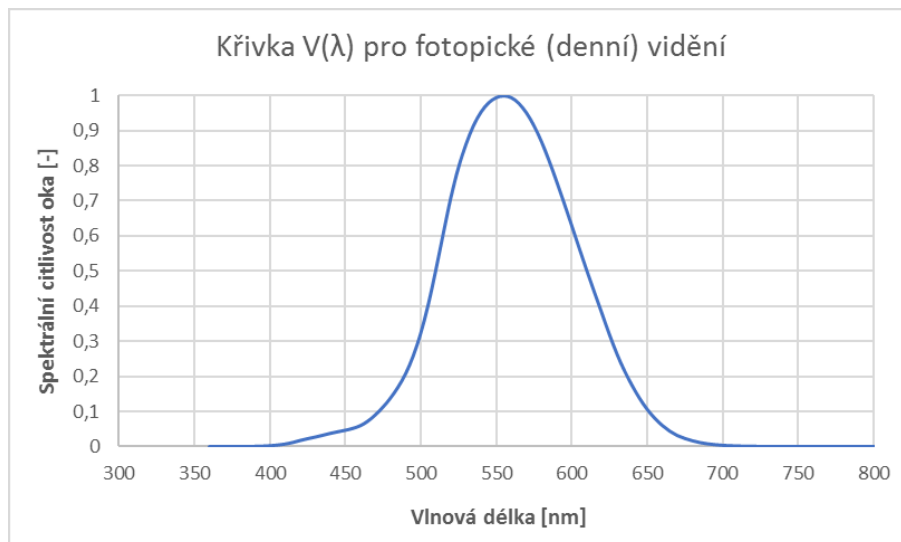


Obr. 23: Relativní spektrum vyzářování sodíkové výbojky



Obr. 24: Relativní spektrum vyzářování bílé LED

Dále bylo zapotřebí vynásobit toto relativní spektrum vyzařování s fotometrickou křivkou $V(\lambda)$ pro tzv. fotopické vidění (na světle) při dané vlnové délce. Na následujícím obrázku vidíme křivku $V(\lambda)$.



Obr. 25: Křivka $V(\lambda)$

Dalším krokem bylo provedení funkce sumy (sečtením) nově vzniklého sloupce. Poté se suma tohoto sloupce vynásobila s maximální hodnotou měrného světelného výkonu, která je na křivce $V(\lambda)$ při 555 nm 683 lm/W a výsledek byl 4215,86.

$$(V(\lambda) \cdot \phi_{\text{REL}})_{\text{SUMA}} \cdot K = 4215,86 \quad (18)$$

kde $(V(\lambda) \cdot \phi_{\text{REL}})_{\text{SUMA}}$...suma vynásobené křivky $V(\lambda)$ a relativního spektra vyzařování
 K ...683 lm/W (maximální hodnota měrného světelného výkonu)

Dále bylo nezbytné získat zesílení pro daný zdroj. Zesílení bylo získáno vydělením světelného toku, který činil u sodíkové výbojky 5900 lm a vypočítaným číslem 4215,86.

$$\text{Zesílení} = \frac{5900}{4215,86} = 1,399$$

Posledním krokem je vynásobit zesílením spektrum relativního vyzařování v každém řádku v MS Excelu [12] a sumou nově vzniklého sloupce dostaneme vyzářený výkon, který činí 16,46 W. To znamená, že celkový vyzářený výkon z příkonu 70 W sodíkové výbojky je 16,46 W. V dalším kroku už jen stačí pomocí trojčlenky vypočítat kolik zářivých wattů dostanu z příkonu jednoho wattu. Výsledek je 0,235 W.

Úplně stejný postup pro získání vyzářeného výkonu z příkonu je i u bílé LED diody, kde jsem dostal 0,444 W z příkonu 1 W.

5.4.2 Výpočet ostatních parametrů pro srovnání světelných zdrojů

Pro zjištění hodnoty vyzářeného toku pro získání 1 klm bylo zapotřebí hodnotu 1000 (představuje 1 klm) vydělit měrným světelným výkonem, který u sodíkové výbojky činí 84 lm/W. Dostal jsem 11,9 W, které vynásobím hodnotou zářivého wattu z příkonu 1 W (u sodíkové výbojky to je 0,235 W) a dostanu 2,797 W pro získání 1 klm. Stejný postup platí i pro bílou LED.

$$\frac{1000 \text{ lm}}{84 \text{ lm/W}} = 11,9 \text{ W}$$

$$11,9 \text{ W} \cdot 0,235 \text{ W} = \mathbf{2,797 \text{ W}}$$

K získání hodnoty světelného toku pro 1 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ stačilo jenom vydělit měrný světelný výkon hodnotou PPF z příkonu 1 W, u sodíkové výbojky výsledek činil 58,3 lm. U bílé LED diody aplikujeme stejný postup.

$$\frac{84}{1,44} = \mathbf{58,3 \text{ lm}}$$

5.4.3 Zhodnocení parametrů světelných zdrojů a optimalizace

Tab. 7: Tabulka výsledků

Světelný zdroj	NAV-E 70 W/I E27	LED White GW CS8PM1.PM	Optimalizace
Příkon	70 W	1 W	5,186
Měrný světelný výkon	84 lm/W	136 lm/W	x
Světelný tok	5900 lm	136 lm	x
Zářivý watt z příkonu 1 W	0,235 W	0,444 W	0,193 W
PPF z příkonu 1 W	1,44 $\mu\text{mol/s}$	2,73 $\mu\text{mol/s}$	1,19 $\mu\text{mol/s}$
Procentuální využití z příkonu	23,51%	44,44%	19,28%
Vyzářený tok pro získání 1 klm	2,797 W	3,263 W	x
PPF z vyzářeného toku pro 1 klm	17,19 $\mu\text{mol/s}$	20,05 $\mu\text{mol/s}$	x
Kolik lm je 1 $\mu\text{mol/s}$	58,3 lm	49,8 lm	x

Pokud se podíváme na tabulku z energetického hlediska, tak je zřejmé, že nejlépe vyšla bílá LED, kde z příkonu 1 W dostaneme 0,444 zářivých wattů (využití z příkonu, neboli účinnost je 44,44%). Druhý nejlepší výsledek vyšel u sodíkové výbojky, kde dostaneme 0,235 zářivých wattů z příkonu 1 W (účinnost je 23,51%). Optimalizace nám v tom to směru nepomohla a dokonce vyšla ze srovnání jako nejhorší varianta (0,193 W z příkonu 1 W, účinnost je 19,28%), ale za to jsme dosáhli přesného naladění výkonu na křivku relativní spektrální citlivosti na FAR. Ruku v ruce se vzrůstající účinností světelného zdroje nám roste i zisk fotosyntetického fotonového toku (PPF), takže nejvíce PPF z příkonu 1 W nám dodá bílá LED a to **2,73 $\mu\text{mol/s}$** , ze sodíkové výbojky dostaneme **1,44 $\mu\text{mol/s}$** a z optimalizace tvořené z barevných LED diod získáme **1,19 $\mu\text{mol/s}$** .

Dalším srovnávacím parametrem byl vztah mezi světelným tokem a PPF. K získání 1 klm je potřeba u bílé LED 3,263 W a tomu odpovídá fotosyntetický fotonový tok 20,05 $\mu\text{mol/s}$. U sodíkové výbojky pro zisk 1 klm se vyzáří 2,797 W a tomu odpovídá 17,19 $\mu\text{mol/s}$, takže z pohledu rostlin je v tomto směru lepší bílá LED, protože dostaneme o 2,86 $\mu\text{mol/s}$ více. Vztah mezi světelným tokem a PPF vychází lépe u bílé LED a není tedy překvapující, že pro získání 1 $\mu\text{mol/s}$ je potřeba **49,8 lm** u bílé LED oproti **58,3 lm** u sodíkové výbojky.

Ze srovnání vyšla nejlépe bílá LED, která je lepší jak z energetického, tak i z pohledu potřeby rostlin než „zastaralé“ sodíkové zdroje.

6 Požadavky na osvětlovací soustavu z pohledu FAR

Nejlepší zdrojem pro pěstování rostlin je Slunce, vždy bylo a bude. Je to dáno čtyřmi miliardami let vzájemného soužití rostlin a Slunce. Neustále se snažíme uměle zvýšit efektivitu osvětlení rostlin a pamatovat, že naše planeta podporuje širokou škálu druhů rostlin pod slunečním světlem několik miliard let. Vztah mezi rostlinou a Sluncem je specifický a dynamický a je třeba pečlivě zvážit jaké aspekty tohoto vztahu vedly k úspěšné venkovní rostlinné výrobě a přenést je do návrhů vnitřního osvětlení.

Uměle vyrobené světelné zdroje nemohou nikdy efektivně nahradit Slunce z hlediska spotřeby energie a šířce spektra tak, že osvětlovací soustava by byla ekonomicky proveditelná. Z toho důvodu je zapotřebí redukovat spektrum, aby to mělo co nejmenší negativní dopad na vývoj rostlin, ale ne naprosto vyřadit ty části spektra FAR, které je podobné tomu, jak jsou rostliny vystavovány v podmínkách přirozeného slunečního světla.

Ve výzkumech této problematiky docházíme k většímu pochopení komplexní souhry mezi vysoce vyvinutým rostlinným systémem a Sluncem, ale nadále je třeba zkoumat fotochemické reakce rostlin, které budou sloužit pro prospěch našich budoucích návrhů umělého osvětlení. Díky získaným znalostem z těchto výzkumů se vyvíjí osvětlovací soustavy, které poskytují intenzitu a FAR spektrum, které jsou energeticky účinné, dlouhé životnosti, se stabilním spektrem a s poskytnutím malých tepelných příspěvků při optimalizaci výrobních postupů produkce plodin. Tato snaha vedla k navrhování světelných zdrojů, které snížily nebo v případě mnoha panelů LED eliminovaly to, co bylo považováno za „promarněné“ vlnové délky, zatímco ty vlnové délky spojené s největší odezvou jsou zesíleny.

Při uvážení, kterou technologii umělého osvětlení je třeba instalovat, musíme mít na paměti, že zvolené světlo ovlivňuje všechny aspekty daného systému, jako je teplota vody, teplota vzduchu, vlhkost, míra absorpce CO₂, odolnost vůči chorobám, odolnost proti škůdcům, produkce ovoce a květů, hustota živin a mnoho dalších. Při podmínkách slunečního záření, kdy rostliny dostávají široké spektrum po celý růstový cyklus, je úspěšný vývoj rostlin dosažen prostřednictvím procesů přirozené rovnováhy, přičemž všechny tyto prvky se shodují, což napomáhá celkovému zdraví rostlin.

Za posledních 40 let se používají umělé osvětlovací systémy osvětlení s vysokou intenzitou neboli HID. Rozdíl mezi pěstiteli ve sklenících a v interiéru, je, že se pěstitelé ve

sklenících spoléhají na sluneční záření jako na primární světelný zdroj a doplňkový osvětlovací systém si zvolí tak, aby získali spektra, které zemědělské plodiny vyžadují a neplýtvají energií.

Nedostatkem u všech systémů HID je, že vyžadují dlouhé časy na ochlazení po vypnutí. Doba ochlazení na plnou intenzitu trvá často 20 minut nebo více. Tento typ technologie není vhodný pro řídicí systémy založené na mikroprocesoru, přičemž úroveň výstupu světla mohou být okamžitě naladěny nebo vypnuty a poté zvednuty nebo sníženy, jak to diktují okolní podmínky. Nakonec je to díky osvětlovacím a řídicím systémům, které nabízejí širší možnosti kontroly. [19]



Obr. 26: Moderní osvětlovací soustava [15]

6.1 Fotosynteticky aktivní osvětlovací soustava ve skleníku

Umělé světelné zdroje se ve sklenících používají pro zvýšení fotosyntetické aktivity a k ovlivnění růstu květů. Ozáření vysoké intenzity je zapotřebí pro fotosyntézu (ve fotometrických jednotkách je to 3 000 až 12 000 lx) a ozáření nízké intenzity je potřeba pro fotoperiodické účinky (50 až 200 lx). Biologické účinky světla na rostliny se hodnotí podle záření, které světlocitlivé orgány rostlin pohltnou a jeho energii přemění ve fotobiologické procesy na rozdíl od funkce světelných zdrojů k vytváření světelné pohody člověka, kdy se hodnotí osvětlení objektů a světlo jimi odražené a dopadající do lidského oka.

Fotosyntetické procesy jsou aktivovány především zářením v oblasti FAR. Hodnotí se energetickými jednotkami, protože snahy hodnotit absorbované záření selektivně podle biologické závislosti fotosyntetických reakcí na vlnové délce se zatím neuplatnilo.

Kromě intenzity fotosynteticky aktivního ozáření fotobiologické aktivity ovlivňuje taky doba, popřípadě dávka ozáření, vyjádřená ve watthodinách na metr čtvereční ($W_{\text{FAR}} \cdot h \cdot m^{-2}$), v některých literárních pracích v lux hodinách ($lx \cdot h$).

Různé zdroje mají rozdílný podíl fotosynteticky aktivního záření. U slunečního záření je to 43 % pro přímé záření z celkového záření (E_{GH}), pro zataženou oblohu je to 57 %. Běžně se bere v úvahu jedna průměrná hodnota, takže $E_{\text{FAR}} = 0,45 E_{\text{GH}}$. Podíl FAR umělých zdrojů světla je hodně odlišný od tohoto podílu slunečního záření a jelikož se u světelných zdrojů uvádějí jejich fotometrické hodnoty (lm , lx), uvádí se podíl FAR v poměru k těmto hodnotám.

Fotoperiodické procesy jsou závislé především na aktivaci fytochromů, kde jejich absorpční spektra leží v oblastech vlnových délek 550 až 790 nm (záření ve žlutozelené až červené oblasti s maximem 660 nm a v oblasti tmavočervené s maximem 730 nm). Záření v těchto oblastech ovlivňuje indukci a vývoj květů a nazývá se fotoperiodicky aktivní (FPR). Jednotkou fotoperiodicky aktivního ozáření je $W_{\text{FPR}} \cdot m^{-2}$.

Rostliny také jinak, než lidské oko posuzují intenzitu ozáření. Pro dobrý zrakový vjem u člověka je důležité osvětlení vodorovných, svislých nebo jinak orientovaných ploch, na nichž jsou rozmístěny pozorované předměty, lidské oko hodnotí odražené záření od těchto předmětů.

U rostlin musíme hodnotit záření dopadající na všechny jejich světlocitlivé plochy, které mohou viditelné záření pohltnout. K hodnocení absorbovaného záření je nejlepší volit kulový vrchlík, jehož osa vždy směřuje ke zdroji světla. Biologické aktivity rostlin probíhají až od určité prahové hodnoty intenzity ozáření a záření dopadající na plochy rostlin pod úhly většími než 70°

se značně nebo úplně odráží a nepřispívá k fotobiologické aktivitě, proto se bere v úvahu u solitérních rostlin výška pomyslného kulového vrchlíku 33 % z průměru koule. Průměrná intenzita ozáření se na takové ploše rovná 67 % hodnoty záření dopadajícího na rovinu kolmou ke směru dopadajících paprsků. Tam kde se rostliny při šikmém dopadu záření navzájem zastiňují, tzn. u souvisle zapojených porostů, nemůžeme již uplatňovat efekt natáčení kulového vrchlíku svou osou do směru přicházejícího záření a uplatňuje se kosinová závislost intenzity ozáření. Z tohoto důvodu je nejpřijatelnější počítat u všech rostlinných porostů s tím, že intenzita ozáření, která ovlivňuje fotobiologické procesy, je rovna 70 % hodnoty záření dopadajícího na normálovou rovinu. Při řešení světelně-technických návrhů soustav na přisvětlování rostlin se tedy počítá s intenzitami ozáření (osvětlení) na roviny kolmé k dopadajícímu záření a tyto hodnoty se redukují součinitelem 0,7. Intenzita ozáření pohlcená rostlinami, která ovlivňuje jejich biologickou aktivitu je tedy považována jako průměrná hodnota takto zredukovaných údajů. [22]



Obr. 27: Skleník [14]

7 Návrh modulu skleníkového osvětlení

Cílem návrhu modulu skleníkového osvětlení je ukázat, jak by se choval světelný zdroj k potřebám rostlin, kolik z příkonu dostanu PPF a následně kolik získám fotosyntetické hustoty fotonového toku (PPFD). Návrh byl realizován v programu ReluxPro. Následující tabulka znázorňuje potřeby PPFD pro různé účely pěstování.

Tab. 8: Tabulka úrovní osvětlenosti [14]

PPFD pro optimální pěstování rostlin	
$> 10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Minimální intenzita pro pokojové rostliny
$15 - 30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Pro zlepšení kvality a omezené zvýšení produkce
$30 - 45 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Pro výsev, sazenice a kultivaci
$40 - 100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Pro celoroční výrobu, např. chryzantémy, růže, byliny, ...
$100 - 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Pro výrobu rostlin s vyššími nároky na světlo (rajčata, okurky)
$100 - 800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Pro pěstování rostlin za zcela umělých světelných podmínek
$350 - 1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Pro výzkumné projekty s vysokou intenzitou světla

Pro návrh osvětlení bylo zvoleno svítidlo SCUBA LED6800-765 PM LDO V2A, které můžeme vidět na následujícím obrázku. Je to svítidlo se stupněm krytí IP 65, odolné proti vlhkosti a chemickým vlivům. Jedná se o bílou LED, takže jsem použil převodní faktor 49,8 jak je uvedeno v Tab. 7.



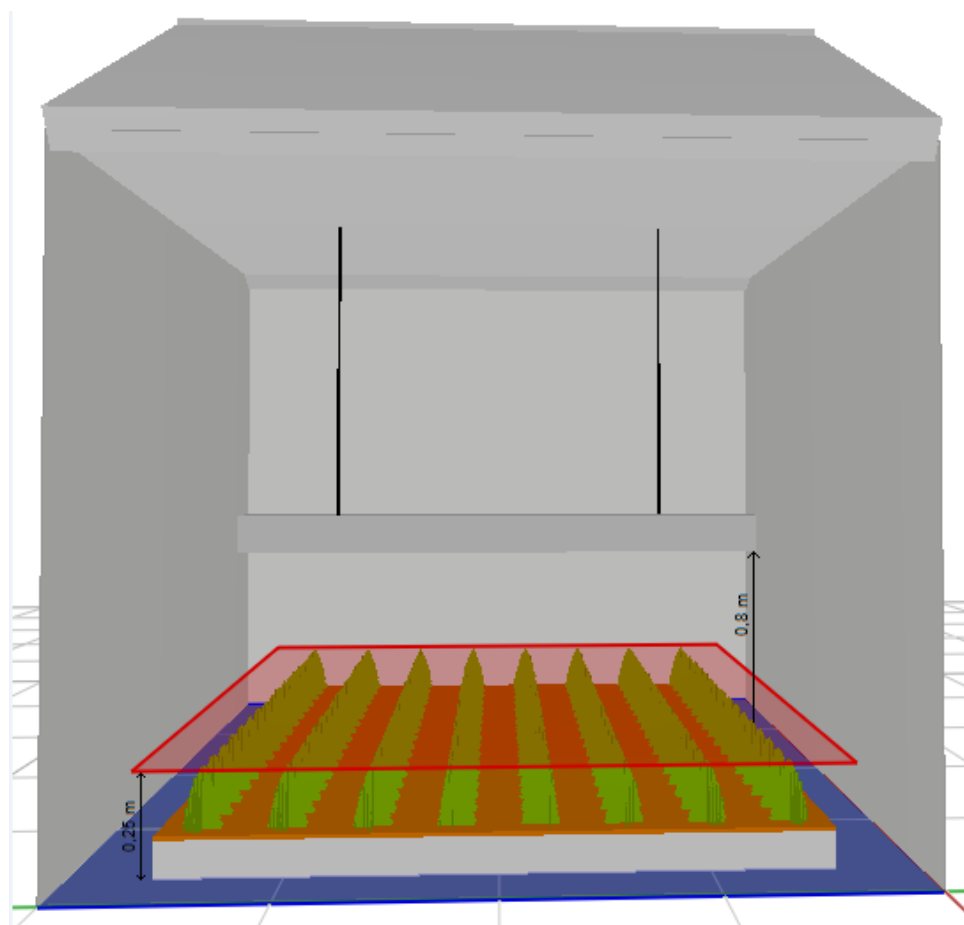
Obr. 28: Svítidlo SCUBA LED6800-765 PM LDO V2A

Tab. 9: Tabulka parametrů použitého svítidla

Příkon	51,3 W
Měrný světelný výkon	139 lm/W
Světelný tok	7110 lm
PPF	142,77 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
PPFD	18,35 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

Z tabulky vidíme, že z příkonu 51,3 W dostaneme PPF s hodnotou 142,77 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ a fotosyntetickou hustotu fotonového toku (PPFD) 18,35 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Obrázek pod tímto textem znázorňuje navržený 3D model modulu skleníkového osvětlení. Rozměry modulu jsou 2 x 2 m, srovnávací rovina je ve vzdálenosti 0,25 m od země a výška svítidla je 0,8 m. Nastavení výpočtu bylo pro přímou složku osvětlenosti a udržovací činitel byl na hodnotě 0,8.



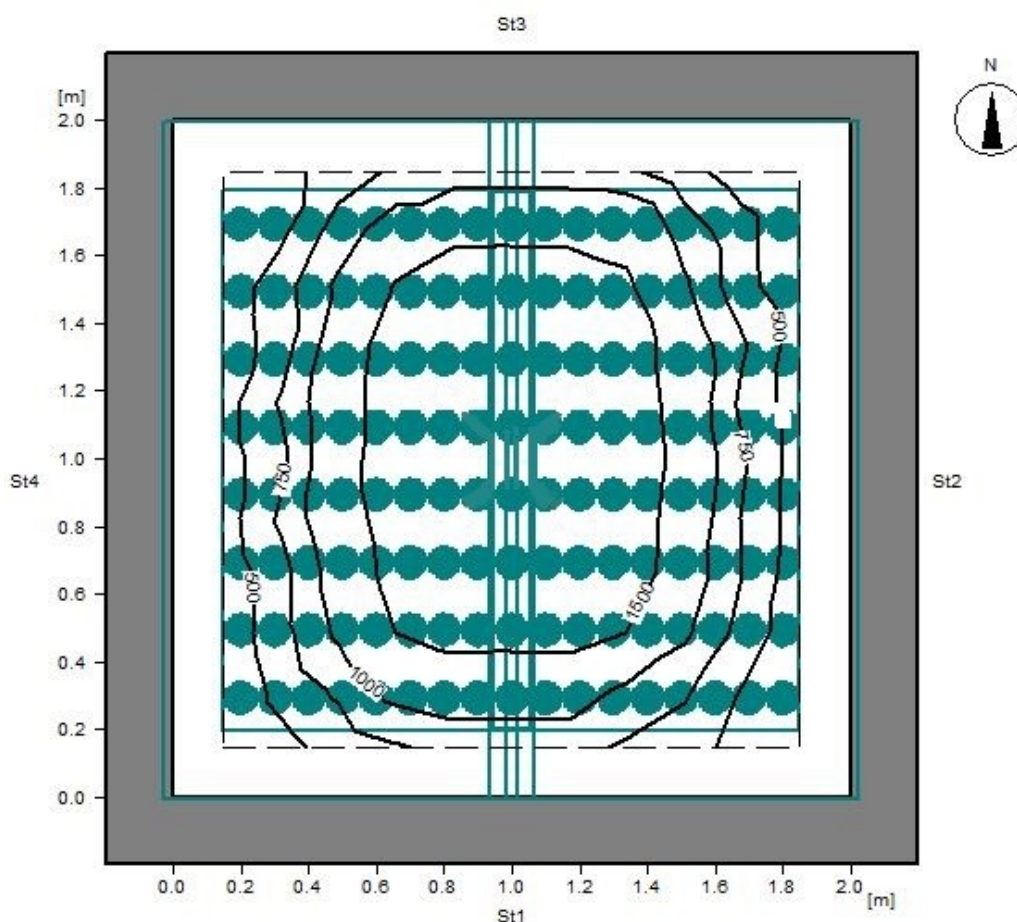
Obr. 29: Návrh modulu skleníkového osvětlení

Na modulu o rozměru 2 x 2 m a s příkonem svítidla 51,3 W tedy dostaneme PPFD s hodnotou $18,35 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ a podle Tab. 8 tato hodnota PPFD spadá do druhé úrovně osvětlenosti, která je určena pro zlepšení kvality a omezené zvýšení produkce.

Pro výpočet hodnoty PPFD je potřeba znát osvětlenost a přepočítávací konstantu. Z ReluxuPro vyšla osvětlenost 914 lx na modul 2 x 2 m. Převodní faktor je 49,8, jak je uvedeno v Tab. 7 pro bílou LED. Vydělením osvětlenosti s hodnotou 914 lx a převodním faktorem 49,8 dostáváme $18,35 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$\frac{914 \text{ lx}}{49,8} = 18,35 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$$

Následující obrázek znázorňuje izoluxy, tedy průběhy osvětleností, které nám dávají informaci o rozložení osvětlenosti, respektive fotosyntetického záření v prostoru.



Obr. 30: Izoluxy

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření metodiky pro zjištění chování různých zdrojů světla pro křivku relativní spektrální citlivosti na FAR, srovnat energetickou náročnost světelných zdrojů ke vztahu k rostlinám a vytvoření návrhu modulu skleníkového osvětlení.

Rostliny mají jinou spektrální citlivost (křivku) než lidské oko, takže jedním ze základů pro vytvoření metodiky k zisku PPF z jednotlivých zdrojů světla bylo využití křivky relativní spektrální citlivosti na FAR. Výrobci světelných zdrojů pro osvětlování rostlin nemají žádnou obecně uznávanou standardu na křivku relativní spektrální citlivosti na FAR, takže jsem vybíral mezi třemi křivkami a zvolil jsem křivku McCree. Dalším základním faktorem byla citlivost rostlin, která má hodnotu $0,00835935 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$. Dalším postupem bylo vytvoření samotné metodiky, kterou jsem vytvořil v programu MS Excel.

Světlo je hlavním faktorem růstu rostlin a přirozené sluneční světlo je náš největší a cenově nejlevnější zdroj světla a energie. Dostupné množství však není vždy dostatečné pro pěstování rostlin. Vzhledem k tomu, že ceny energií stále rostou a poptávka se zvyšuje, je třeba nalézt rovnováhu mezi energeticky účinným osvětlením při pěstování rostlin a využíváním elektrické energie.

Pro srovnání energetické náročnosti světelných zdrojů jsem vybral vysokotlakou sodíkovou výbojku, bílou LED diodu a sedm barevných LED diod pro vytvoření optimalizace. Nejlépe ze srovnání vyšla bílá LED, kde z příkonu 1 W dostaneme 0,444 zářivých wattů a z toho PPF o hodnotě 2,73 $\mu\text{mol/s}$. Druhý nejlepší výsledek vyšel u sodíkové výbojky, kde dostaneme 0,235 zářivých wattů z příkonu 1 W a 1,44 $\mu\text{mol/s}$. Optimalizace nám v tom to směru nepomohla a dokonce vyšla ze srovnání jako nejhorší varianta (0,193 W z příkonu 1 W a zisk 1,19 $\mu\text{mol/s}$), ale za to se dosáhlo přesného naladění výkonu na křivku relativní spektrální citlivosti na FAR. Dalším srovnávacím parametrem byl vztah mezi světelným tokem a fotosyntetickým fotonovým tokem. Pro získání 1 $\mu\text{mol/s}$ je potřeba 49,8 lm u bílé LED oproti 58,3 lm u sodíkové výbojky. Vztah mezi světelným tokem a PPF tedy vychází lépe u bílé LED. Ze srovnání vyšla nejlépe bílá LED ve všech srovnávacích parametrech, je lepší jak z energetického, tak i z pohledu potřeby rostlin.

LED diody mají jednu z nejvyšších účinností přeměny elektrické energie na světlo a mají také velmi dobré elektrické a světelně technické parametry, mezi které patří hlavně vysoká životnost a měrný světelný výkon. Různé plodiny vyžadují rozdílné světelné spektrum pro optimální vývoj a kvalitu, poskládáním vhodných vlnových délek pomocí diod LED umožní přizpůsobení spektra pro optimalizaci kvality růstu. Generování specifikovaných spekter pro konkrétní plodiny je tedy další důležitou výhodou LED oproti běžným světelným zdrojům.

Vysokotlaké sodíkové výbojky poskytují velmi vysoké hodnoty světelných toků, ale s horšími spektrálními vlastnostmi. V případě výbojek pro pěstování rostlin se výrobci snaží obohatit výsledné spektrum i o modrou složku spektra. Výbojky však produkují více tepla, s čímž je třeba v některých případech počítat a zajistit jeho odvod. Produkce tepla omezuje vzdálenost svítidla od rostlin a tím se budou zvyšovat ztráty.

Cílem návrhu modulu skleníkového osvětlení bylo zjistit, kolik z příkonu světelného zdroje získám fotosyntetické hustoty fotonového toku (PPFD). Návrh byl realizován v programu ReluxPro.

Zvolil jsem svítidlo typu SCUBA LED se stupněm krytí IP 65, odolné proti vlhkosti a chemickým vlivům. Program ReluxPro vypočítal osvětlenost 914 lx na modul 2 x 2 m při přímé složce osvětlenosti a z příkonu svítidla 51,3 W. Při použití přepočítávací konstanty, která je v Tab. 7 dostaneme PPFD o hodnotě $18,35 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Tato hodnota PPFD spadá do druhé úrovně osvětlenosti, která je určena pro zlepšení kvality a omezené zvýšení produkce.

Použitá literatura

- [1] HLADKÝ, Luděk. Osvětlení z pohledu rostlin. *Světlo* [online]. 2010, č. 4 [cit. 2018-2-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/41827.pdf>
- [2] HAŠ, Stanislav a Petra PAVLÍČKOVÁ. Osvětlování okrasných rostlin v interiérech. *Světlo* [online]. 2010, č. 4 [cit. 2018-2-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/41828.pdf>
- [3] KINCL, Miloslav a Václav KRPEŠ. Základy fyziologie rostlin. 2. dopl. vyd. Ostrava: Montanex, 2000. ISBN 80-7225-041-8.
- [4] SEDLECKÝ, Libor. *Vliv světla na fotomorfogenezi u rostlin ve výuce biologie na středních školách* [online]. Praha, 2010 [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <http://kfrserver.natur.cuni.cz/studium/bakalar/prace/2010LS/sedlecky.pdf>.
Bakalářská práce. Karlova univerzita, Přírodovědecká fakulta.
- [5] JEDLIČKA, Miroslav. Světlo a fotonika – I. část. *Světlo* [online]. 2005, č. 3 [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/svetlo-a-fotonika-i-cast--16408>
- [6] BANDOLA, Jakub. *Inteligentní systém osvětlení pro kultivaci rostlin* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/119233>.
Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [7] MATOUŠ, Martin a Petr HUTLA. Světlo a rostlina. *Světlo* [online]. 2002, č. 4 [cit. 2018-3-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/svetlo-a-rostlina--16917>
- [8] KRBAL, Michal, Petr BAXANT a Jan ŠKODA.
Svítilna a světelné zdroje pro pěstování rostlin. *Electric power engineering 2012*. 2012.
- [9] MĚŘENÍ SVĚTLA, Praktikum experimentálních metod fyziologie rostlin (KBF/PEMFR) [online]. Olomouc [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: www.biofyzika.upol.cz/userfiles/file/MERENI_SVETLA.docx
Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta.

- [10] *Light and Lighting Control in Greenhouses* [online]. Canada, 2017, 3 August 2017 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <http://www.arguscontrols.com/resources/Light-and-Lighting-Control-in-Greenhouses.pdf>
- [11] DRDA, Tomáš. Metodiky výpočtu. *MS Excel (list: Výpočet PPF)*. Příloha 1 této diplomové práce. [cit.2018-04-29].
- [12] DRDA, Tomáš. Metodiky výpočtu. *MS Excel (list: Výpočet vyzářeného výkonu)*. Příloha 1 této diplomové práce. [cit.2018-04-29].
- [13] HAŠ, Stanislav a Lucie FIKAROVÁ. Navrhování osvětlení pro interiérové květiny. *Světlo* [online]. 2011, č. 3 [cit. 2018-4-18]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43808.pdf>
- [14] *Professional lighting: Wir machen das Spektrum!* [online]. Deutschland: DH Licht Professional Lighting, 2018 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.dhlicht.de/download-center/>
- [15] *Professional lighting: Licht der neuen Generation* [online]. Deutschland: DH Licht Professional Lighting, 2016 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.dhlicht.de/download-center/>
- [16] ROBERTS, Michael. *What light do plants need?* [online]. EconoLux Industries Limited, 2016 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.induluxtech.com/What%20Light%20Do%20Plants%20Need-Net.pdf>
- [17] SAGER, John a Craig MCFARLANE. *Plant growth chamber handbook: Radiation* [online]. Langhans, February 1997 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.controlledenvironments.org/wp-content/uploads/sites/6/2017/06/Ch01.pdf>
- [18] PINHO, Paulo. *Usage and control of solid-state lighting for plant growth* [online]. Espoo, 2008 [cit. 2018-04-19]. ISBN 978-951-22-9502-9. Dostupné z: <http://lib.tkk.fi/Diss/2008/isbn9789512295029/isbn9789512295029.pdf>. Disertace. Helsinki University of Technology Department of Electronics.
- [19] *Measuring Plant Lighting* [online]. San Diego: Inda-Gro Lighting Systems [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.indagro.com/IG/sites/default/files/pdf/MeasuringPlantLight.pdf>

- [20] MCCREE, K. J. *THE ACTION SPECTRUM, ABSORPTANCE AND QUANTUM YIELD OF PHOTOSYNTHESIS IN CROP PLANTS* [online]. Texas, 1972 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: https://www.vegenaut.com/pl/wp-content/uploads/sites/2/2017/07/PPFD_essential_article.pdf. Institute of Life Science and Biology Department, Texas A and M University, College Station.
- [21] HELMENSTINE, Todd. How to Solve an Energy From Wavelength Problem. *ThoughtCo*. [online]. 15 Mar 2018 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/energy-from-wavelength-example-problem-609479>
- [22] HAJZLER, Miroslav a Stanislav HAŠ. Fotosynteticky aktivní osvětlovací soustava ve skleníku Fata Morgana. *Světlo* [online]. 2008, č. 4 [cit. 2018-4-19]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37602.pdf>
- [23] 1) Světlo – barva a vlnová délka. In: *Ústav experimentální botaniky AV ČR* [online]. Praha: Ústav experimentální botaniky AV ČR [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: http://www.ueb.cas.cz/cs/system/files/users/public/kolar_27/PDF_soubory/postery_rostliny_svetlo.pdf
- [24] Elektromagnetické spektrum. In: *LabGuide: Průvodce laboratoří* [online]. LabGuide, 2015, 27.1.2015 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://labguide.cz/fluorochromy/elektromagneticke-spektrum/>
- [25] Sper Scientific 850009 UV Light Meter. In: *Amazon* [online]. Amazon [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/Sper-Scientific-UV-Light-Meter/dp/B00WR9PN2C>
- [26] Stellar-RAD. In: *RMI, s.r.o. – laboratorní technika* [online]. RMI [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.rmi.cz/stellar-rad>
- [27] SOUMAR, František. Jak změřit osvětlenost při použití LED zdrojů. In: *Doublepower!!* [online]. Praha: doublepower!!, 2016, 19.9.2016 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.doublepower.cz/jak-zmerit-osvetlenost-pri-pouziti-led-zdroju/>
- [28] VIALOX NAV-E/I. In: *Osram: Digital lighting systems* [online]. Osram [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: https://www.osram.com/ds/ecat/VIALOX%20NAV-E-I-High-pressure%20sodium%20vapor%20lamps%20for%20open%20and%20enclosed%20luminaires-High%20intensity%20discharge%20lamps-Lamps/com/en/GPS01_1028099/PP_EUROPE_Europe_eCat/ZMP_58248/
- [29] GW CS8PM1.PM-LRLT-XX55-1. In: *Mouser electronics* [online]. Mouser electronics [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/OSRAM-Opto-Semiconductors/GW-CS8PM1PM-LRLT-XX55-1?qs=xC%252bE9h5iuX6QtR5jh26oGg%3d%3d>

Seznam obrázků

Obr. 1: Absorpční spektrum tří důležitých listových barviv [23].	11
Obr. 2: Proces fotosyntézy [1].	14
Obr. 3: Světelné spektrum elektromagnetického vlnění [24].	14
Obr. 4: Spektrální citlivost lidského oka [1].	17
Obr. 5: Relativní spektrální citlivost na FAR [1].	17
Obr. 6: Radiometr [25].	20
Obr. 7: Spektrometr [26].	21
Obr. 8: Poměrná fotosyntetická účinnost FAR [7].	22
Obr. 9: Fotometrická křivka pro fotopické vidění [27].	28
Obr. 10: Porovnání fotopické (černá) a skotopické (zelená) fotometrické křivky [9].	28
Obr. 11: Absorpční spektrum rostlinných pigmentů [16].	32
Obr. 12: Absorpční vrcholy rostliny [16].	33
Obr. 13: The McCree curve [17].	34
Obr. 14: The PAR curve [16].	35
Obr. 15: German DIN Standard 5031-10 [16].	36
Obr. 16: Srovnání křivek McCree a PAR [16].	36
Obr. 17: Srovnání křivek McCree a PAR se slunečním spektrem [16].	37
Obr. 18: Relativní spektrální vyzařování diody deep blue z datasheetu.	42
Obr. 19: Vialox NAV-E 70 W (vlevo) a bílá LED GW CS8PM1.PM [28], [29].	45
Obr. 20: Spektrum výbojky a křivka McCree.	46
Obr. 21: Spektrum bílé LED a křivka McCree.	47
Obr. 22: Optimalizace spektra.	48
Obr. 23: Relativní spektrum vyzařování sodíkové výbojky.	49
Obr. 24: Relativní spektrum vyzařování bílé LED.	49
Obr. 25: Křivka $V(\lambda)$.	50
Obr. 26: Moderní osvětlovací soustava [15].	54
Obr. 27: Skleník [14].	56
Obr. 28: Svítidlo SCUBA LED6800-765 PM LDO V2A.	57

Obr. 29: Návrh modulu skleníkového osvětlení.....	58
Obr. 30: Izoluxy.....	59

Seznam tabulek

Tab. 1: Vlnové délky a energie fotonů pro různá pásma světelného spektra [4], [5].....	15
Tab. 2: Zvolené diody od Osramu.....	41
Tab. 3: Ukázka výpočtů pro diodu deep blue [11].....	43
Tab. 4: Srovnání vypočteného a změřeného PPF [11].....	44
Tab. 5: Zvolené diody pro optimalizaci.....	45
Tab. 6: Optimalizace podle křivky McCree.....	48
Tab. 7: Tabulka výsledků.....	52
Tab. 8: Tabulka úrovní osvětlenosti [14].....	57
Tab. 9: Tabulka parametrů použitého svítidla.....	58

Seznam příloh

Příloha 1: MS Excel – Metodiky výpočtu (CD příloha)

Příloha 2: CD – Diplomová práce